

文章编号: 0253-2697(2009)06-0809-07

# 柴达木盆地三湖地区第四系生物气运聚成藏的定量研究

李明诚<sup>1</sup> 李 剑<sup>2</sup> 张凤敏<sup>2</sup> 张 英<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学能源学院 北京 100083; 2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院 河北廊坊 065007)

**摘要:** 三湖地区第四系生物气在地下运聚的相态以游离气为主,约占生气量的 70% 以上,为该区直接形成游离相生物气藏提供了物质基础。生物气在地下的聚集成藏主要受控于同生圈闭,因此只有在下更新统  $K_1$  同生背斜定型(距今 1.35 Ma)后排出和析出的游离气量才是可供聚集的有效排气量。压实水动力和浮力是游离气垂向运聚成藏的直接动力,可提供  $9.72 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$  的有效气量;下渗水动力是含气水流侧向运移的动力,可提供  $1.08 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$  的有效气量。根据运聚动力、运聚数量和聚集样式的分析,三湖地区第四系生物气可概括为“自生自储、以近源垂向运聚为主、受同生圈闭控制”的成藏模式。在此基础上预测该区第四系生物气的地质资源量为  $11210 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,三级储量为  $5604 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

**关键词:** 柴达木盆地;三湖地区;第四系;游离相生物气;同生圈闭;有效排气量;成藏模式

**中图分类号:** TE112.31

**文献标识码:** A

## Quantitative research on biogas migration-accumulation and pool-forming in the Quaternary of Sanhu area in Qaidam Basin

LI Mingcheng<sup>1</sup> LI Jian<sup>2</sup> ZHANG Fengmin<sup>2</sup> ZHANG Ying<sup>2</sup>

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Langfang Branch, PetroChina Exploration and Development Research Institute, Langfang 065007, China)

**Abstract:** The migration and accumulation phase of biogas in the Quaternary of Sanhu area in Qaidam Basin is mainly free-phase gas accounted for more than 70% in total, which can provide the material base for the accumulation of free-phase biogas in this area. Bio-gas pools underground are mostly controlled by contemporaneous trap. So, the free-phase gas expelled and released after shaping of the syn-sedimentary anticline in the Lower Pleistocene(1.35 Ma before present)is the effective expulsion gas quantity. The compaction hydrodynamic and buoyancy are the direct motivation for the vertical movement of the free-phase gas and can provide  $9.72 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$  of effective expulsion gas quantity. The downward infiltration hydrodynamic is the impetus of lateral migration of the contained gas current and can offer  $1.08 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$  of effective expulsion gas quantity. According to the dynamic, quantity and style features of free-phase gas migration and accumulation, the Quaternary gas accumulation model can be summarized as “self-generation and self-accumulation, dominated by vertical migration-accumulation near the source and controlled by the contemporaneous trap”. The geologic resources of biogas count up  $11210 \times 10^8 \text{ m}^3$  and the possible reserves are  $5604 \times 10^8 \text{ m}^3$  in the Quaternary of Sanhu area.

**Key words:** Qaidam Basin; Sanhu area; Quaternary; free-phase biogas; contemporaneous trap; effective expulsion gas quantity; gas pool-forming model

生物气是指有机质经过微生物的发酵与合成作用而形成的甲烷气体,一般产在地温低于  $80^\circ\text{C}$ 、以厌氧细菌活动为主的浅层环境中。生物成因气具有巨大的经济价值,初步估计约占全球天然气资源的  $1/5$ ,现已成为国内外天然气勘探的重点领域。自 20 世纪 70 年代以来,在柴达木盆地三湖地区第四系中先后发现了涩北 1、涩北 2、台南、台吉乃尔等生物气田,其资源量约为  $(1.2 \sim 1.4) \times 10^{12} \text{ m}^3$ <sup>[1]</sup>,是目前世界上第四系生

物气规模最大的地区。

三湖地区生物气的生成、运移和聚集均发生在距今 2.8 Ma 以来,但在该区第四系成岩差、孔隙度大、渗透率高、地层产状平缓的砂泥岩中生物气如何运聚成藏的问题,并没有完全解决。在此,笔者主要从定量的角度对三湖地区第四系生物气进行了分析,以求能为该区的成藏研究提供一种思路和方法,而文中的实际数据仅供参考。

1 三湖地区的地质概况

1.1 三湖地区的位置及研究区范围

三湖地区位于柴达木盆地的东部,在构造上其主

要部分属于三湖坳陷,因区内包括台吉乃尔湖、涩聂湖、达布逊湖等现代盐湖而得名。此次研究的范围大致为大参1井、乌参1井、鸭参3井和全参1井所围限的区域,面积为 $2.4\times 10^4\text{ km}^2$ (图1)。

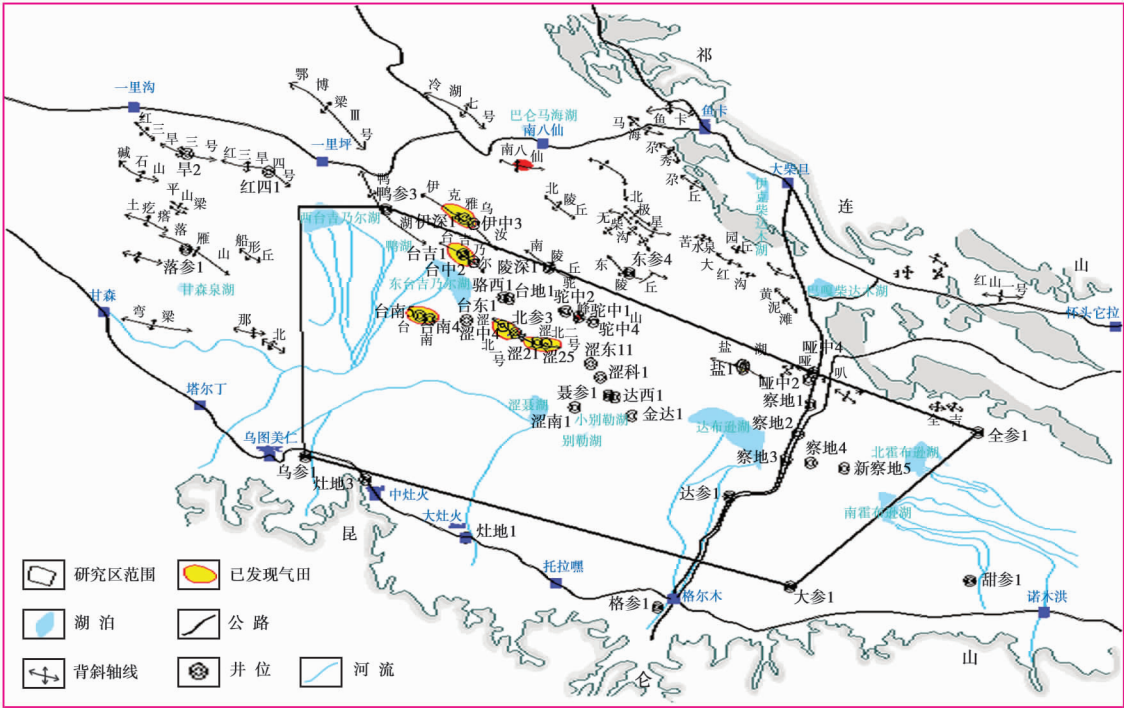


图1 研究区位置及范围  
Fig.1 Location and range of the studied area

1.2 三湖地区的构造和沉积特征

柴达木盆地自中生代形成以来,在区域构造应力作用下,逐步由断陷盆地转变为新生代的坳陷盆地,其沉降中心也不断向东扩展;到第四纪更新世早期,西部湖盆收缩,而东部地区发生沉降形成三湖坳陷;到更新世末,整个盆地隆升,结束了湖盆的沉积形成干盐湖,而现今的盐湖则主要是全新世以来大气降水的溶蚀湖<sup>[2]</sup>。

该区第四系直接不整合于第三系上新统狮子沟组(N<sub>2</sub><sup>3</sup>)之上,其岩性主要是泥岩、粉砂质泥岩和粉砂岩,属内陆河湖相沉积,一般厚度约为2 000 m,最大厚度可达3 600 m,其中泥质岩平均约占75%。根据测井标准层(K<sub>1</sub>—K<sub>13</sub>)的可对比性和含气性,将第四系下更新统划分为K<sub>13</sub>—K<sub>10</sub>(距今2.80~2.44 Ma)、K<sub>10</sub>—K<sub>5</sub>(距今2.44~1.94 Ma)、K<sub>5</sub>—K<sub>2</sub>(距今1.94~1.51 Ma)和K<sub>2</sub>以上(距今1.51 Ma以来)4个含气层段<sup>[3-4]</sup>。

1.3 三湖地区的水文地质条件

三湖地区是柴达木盆地第四纪的沉降中心,也是第四纪的汇水盆地。只是此时祁连山南麓由于断褶作用形成山前小断陷,阻隔了祁连山主脉水系向南补给。

因此,对三湖地区而言,绝大部分水源来自南边的昆仑山水系。

地下水是指地面以下岩土孔隙中的水,主要包括潜水和层间水。三湖地区的潜水面一般浅于100 m,因此潜水和地表径流与生物气的运聚成藏关系不大;只有下渗的层间水可在水头差作用下向低势区流动,对生物气的运聚成藏有一定的影响。

根据卡尔采夫的定义<sup>[5]</sup>,可以把三湖地区第四纪看成一个水文地质旋回,即早中更新世的沉积水文地质阶段(主要发育压实流)和晚更新世—全新世的渗入水文地质阶段(主要发育下渗重力流)。

2 三湖地区第四系生物气成藏的地质要素

2.1 三湖地区第四系生物气的气源岩

第四系生物气源岩主要发育在下更新统地层中,其岩性以深灰—浅灰色的泥质岩为主,有机碳含量虽不高(平均为0.3%),但模拟有机碳产气量却平均高达350 m<sup>3</sup>/t<sup>[3]</sup>。这说明生物气源岩的好坏并不完全以有机碳含量高低为评价标准<sup>[6]</sup>,主要在于是否含有适

于微生物生长、繁衍的富氢、富氧有机组分。三湖地区第四系各层段气源岩的厚度与分布见表 1。

表 1 三湖地区第四系各层段气源岩厚度及分布范围  
Table 1 The thickness and distribution area of gas source rocks in Quaternary of Sanhu area

层 段	K <sub>13</sub> —K <sub>10</sub>	K <sub>10</sub> —K <sub>5</sub>	K <sub>5</sub> —K <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> 以上	总计
沉积时间/Ma	0.36	0.50	0.43	1.51	2.8
平均沉积速率/(mm·a <sup>-1</sup> )	0.77	0.79	0.87	0.43	
平均地层厚度/m	277.2	395	374	724.8	1771
平均泥岩含量/%	66	74	81	73	
气源岩厚度/m	183	292	303	239	1017
分布范围/(10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup> )	1.5	2.0	2.0	1.5	

注:表中各参数主要来自中国石油青海油田公司内部资料。

2.2 三湖地区第四系生物气的储集层

第四系生物气的储集层主要是粉砂岩和泥质粉砂岩,单层厚度一般只有 1~3 m,累计厚度可达 300 m 左右。砂质岩与泥质岩频繁间互,具有多薄层的源储组合特征。

第四系沉积目前尚处于早期成岩的压实阶段,岩石结构松散,原生孔隙发育,孔隙度一般为 25%~41%;随泥质含量的变化,渗透率有较大的差异。细砂岩、粉砂岩的渗透率一般为(100~500)×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,泥质粉砂岩一般为(10~100)×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,从细砂岩、粉砂岩到泥质粉砂岩,排替压力由小到大为 0.045 MPa、0.1 MPa 和 1 MPa,孔喉中值半径分别为 0.085 μm、0.16 μm 和 0.5 μm。总体上属于高孔隙度、高渗透率的良好储集层。

2.3 三湖地区第四系生物气的封盖层

第四系生物气的封盖层主要是与砂质岩间互的泥质岩层,它们既是气源岩也是盖层,在剖面上形成了多套叠置的生储盖组合,因此在封闭机理上属多层物性封闭和多层烃浓度封闭。

地下盖层的封闭能力取决于盖层与储层之间的排替压力差。若以该区排替压力为 0.02~0.2 MPa 的最差盖层与排替压力为 0.045~0.1 MPa 的优质储层相组合,尚有 0.025~0.1 MPa 的排替压力差。储、盖层排替压力差与所封盖的有效气柱之间的关系式为

$$Z = p_d / [(\rho_w - \rho_g) g] \quad (1)$$

式中:Z 为封盖的有效气柱高度,m;p<sub>d</sub> 为储、盖层的排替压力差,MPa;ρ<sub>w</sub> 为地层水密度,g/cm<sup>3</sup>;ρ<sub>g</sub> 为生物气密度,g/cm<sup>3</sup>;g 为重力加速度,m/s<sup>2</sup>。

利用式(1)可以计算出直接盖层可封盖的有效气柱高度为 2~10 m。而第四系中的储层一般是厚度为 1~3 m 的薄层,只有极个别的砂层厚度达到 10 m;再者,即使直接盖层被突破,还可以进入上一个储盖组合

而被封盖。另外,高盐度的地层水和大量蒸发析出盐分堵塞孔隙也可大大提高封闭能力。因此,正是在多个含盐水盖层的封闭下,由多个含气薄储层组成的大气田才得以形成。

2.4 三湖地区第四系生物气的圈闭

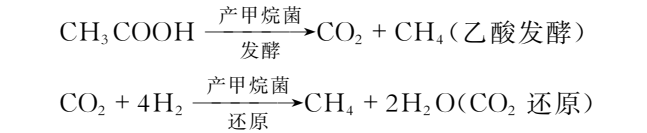
目前,三湖地区已发现气藏(田)的圈闭类型大都属于同沉积背斜,又称同生背斜。此外,预测该区还可能存在同沉积的岩性上倾尖灭和砂岩透镜体圈闭。

第四系生物气只有在同生圈闭中才能保存并聚集成藏,因此同生圈闭何时定型就成为气藏(田)能否形成的关键。据前人的研究<sup>[7]</sup>,涩北一号构造在早更新世 K<sub>1</sub> 沉积期(距今 1.35 Ma)才达到定型,才真正具有形成工业气藏的圈闭条件。三湖地区其他第四系同生背斜大都具有与之相同的演化史。

3 三湖地区第四系生物气成藏的地质作用

3.1 三湖地区第四系生物气的生成作用

生物气是在缺氧环境下,有机质经过甲烷菌、碳酸盐还原菌等微生物的发酵与合成作用所形成的甲烷气体。其化学反应式为<sup>[8]</sup>



一般认为 20~80℃ 是适于甲烷菌生存的温度。若按三湖地区第四系地温梯度 3.78℃/hm 计算,则从地表至 2000 m 深度都有生物气生成。

按生气率法分别计算了更新统 4 个层段的生气量(表 2)。生气率法计算生气量的公式为

$$Q_g = V \cdot \rho_r \cdot C \cdot R_c \cdot K_c \quad (2)$$

式中:Q<sub>g</sub> 为生气量,10<sup>12</sup> m<sup>3</sup>;V 为源岩体积,10<sup>10</sup> m<sup>3</sup>;ρ<sub>r</sub> 为源岩平均密度,t/m<sup>3</sup>;C 为有机碳平均含量,%;R<sub>c</sub> 为有机碳恢复系数;K<sub>c</sub> 为有机碳生气率,m<sup>3</sup>/t。

表 2 第四系各层段气源岩生气量计算参数和结果  
Table 2 Gas generating quantity of gas source rocks in Quaternary and its calculation parameters

层 段	K <sub>13</sub> —K <sub>10</sub>	K <sub>10</sub> —K <sub>5</sub>	K <sub>5</sub> —K <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> 以上	总计
源岩体积/(10 <sup>10</sup> m <sup>3</sup> )	274.5	584	606	358.5	
源岩平均密度/(t·m <sup>3</sup> )	2.2	2.1	2.0	1.9	
有机碳平均含量/%	0.33	0.28	0.26	0.22	
有机碳恢复系数	3.6	3.6	3.6	3.6	
生气率/(m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	300	300	300	300	
生气量/(10 <sup>12</sup> m <sup>3</sup> )	21.5	37.09	34.03	16.19	108.81

3.2 三湖地区第四系生物气的运移作用

3.2.1 第四系生物气运移的相态

生物气在地下运移的相态主要有水溶相、游离相和扩散相,它们同时存在并可随温度、压力、浓度的变化而相互转换。甲烷在水中有相当大的溶解度,因此,只有在满足了水相溶解之后才可能出现游离相。水溶气量的计算公式为

$$Q_{\text{wgm}} = A_{\text{d}} \cdot h \cdot \phi \cdot S_{\text{g}} \tag{3}$$

式中:  $Q_{\text{wgm}}$  为水溶气量,  $10^{12} \text{ m}^3$ ;  $A_{\text{d}}$  为地层分布面积,  $10^4 \text{ km}^2$ ;  $h$  为平均地层厚度,  $\text{m}$ ;  $\phi$  为地层平均孔隙度, %;  $S_{\text{g}}$  为甲烷的平均水溶解度,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ 。

根据研究区实际情况,式(3)中各参数取值如下:  $A_{\text{d}} = 2.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ ;  $h = 2 \text{ km}$ ;  $\phi = 25\%$ ;  $S_{\text{g}} = 2.5 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。由式(3)计算可知,平均水溶气量为  $30 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。而平均游离气量则为生气量与平均水溶气量的差值,即  $78.81 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。由此可见,第四系生物气在地下赋存和运移的相态以游离相为主,这也是该区直接形成游离相生物气藏的重要原因。

3.2.2 第四系生物气运移的动力

(1) 水溶相生物气随压实水运移,其动力主要是由压实作用所产生的剩余压力。剩余压力的计算式为<sup>[9]</sup>

$$E = (\rho_{\text{b}} - \rho_{\text{w}}) g h_1 \tag{4}$$

式中:  $E$  为剩余压力,  $\text{MPa}$ ;  $\rho_{\text{b}}$  为岩石骨架密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $h_1$  为上覆地层厚度,  $\text{m}$ 。

在三湖地区第四系以泥质岩为主的情况下,压实流体主要是由下往上运移。此外,到更新世末,特别是距今  $0.03 \text{ Ma}$  以来,由于青藏高原迅速隆升,下渗水流逐渐加强,在水势差(水动力)作用下,下渗水流沿砂层由南往北运移。这也是水溶相生物气运移的一种动力。

(2) 游离相生物气运移的主要动力是剩余压力和浮力。由于两者运移的大方向基本一致,因此游离相生物气运移的主要动力往往是两者的合力。只是游离相生物气在地层孔喉系统中一般要达到  $10\%$  的临界饱和度,才能随压实水流呈气—水两相连续运移<sup>[9]</sup>,否则呈分散状随水运移,当遇到垂直裂缝或断层时可直接上浮。

(3) 扩散相生物气运移的动力主要是甲烷的浓度差,它是一种不具相态的从高浓度向低浓度方向扩散的分子流动。在地下主要是通过岩石的孔隙水进行扩散,其扩散系数一般为  $10^{-7} \sim 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ <sup>[9]</sup>。第四系中的泥质岩是气源岩,甲烷浓度高,所以其扩散大方向

首先是指向四周的砂岩,在上下方浓度封闭的情况下不断向侧面扩散。

3.2.3 第四系生物气运移的数量

(1) 水溶相排气量。先根据压实原理计算出各层段气源岩的排水量,再分别乘以甲烷的水溶解度,即可计算出水溶相排气量。其公式为<sup>[9]</sup>

$$Q_{\text{wg}} = V \cdot (\phi_0 - \phi_{\text{r}}) \cdot (1 - \phi_0)^{-1} \cdot S_{\text{g}} \tag{5}$$

式中:  $Q_{\text{wg}}$  为水溶相排气量,  $10^{12} \text{ m}^3$ ;  $\phi_0$  为生物气开始生成( $20^\circ\text{C}$ 、 $400 \text{ m}$  埋深)时的孔隙度,取值  $40\%$ ;  $\phi_{\text{r}}$  为气源岩平均孔隙度, %。

三湖地区第四系各层段气源岩水溶相排气量及相关计算参数见表 3。

表 3 第四系各层段气源岩水溶相排气量的计算参数和结果  
Table 3 The calculation parameters and results for expulsion of water-solution-phase gas of gas source rocks in Quaternary

层 段	K <sub>13</sub> —K <sub>10</sub>	K <sub>10</sub> —K <sub>5</sub>	K <sub>5</sub> —K <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> 以上	总计
平均埋深/ $\text{m}$	2 300	1 900	1 400	800	
平均孔隙度/%	21	23	26	34	
平均水溶解度/ $(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	2.4	2.0	1.6	1.2	
水溶相排气量/ $(10^{12} \text{ m}^3)$	2.1	3.31	2.26	0.43	8.1

(2) 游离相排气量。与水溶相排气量计算原理相似,其计算公式为<sup>[9]</sup>

$$Q_{\text{fg}} = V \cdot (\phi_0 - \phi_{\text{r}}) \cdot (1 - \phi_0)^{-1} \cdot S_{\text{Fg}} \tag{6}$$

式中:  $Q_{\text{fg}}$  为游离相排气量,  $10^{12} \text{ m}^3$ ;  $S_{\text{Fg}}$  为气源岩排气饱和度,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ 。

$S_{\text{fg}}$  可由源岩中的含气饱和度减去气—水两相运移的临界排气饱和度而求得。一般取  $10\%$  ( $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ) 作为地层条件下的临界排气饱和度,因此要利用波义尔-盖吕萨克定理,根据各层段的地温和压力换算成地表条件下的临界排气饱和度。三湖地区第四系各层段气源岩游离相排气量及相关计算参数见表 4。

表 4 第四系各层段气源岩游离相排气量的计算参数和结果  
Table 4 The calculation parameters and results for expulsion of free-phase gas of gas source rocks in Quaternary

层 段	K <sub>13</sub> —K <sub>10</sub>	K <sub>10</sub> —K <sub>5</sub>	K <sub>5</sub> —K <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> 以上	合计
压实排水量/ $(10^{12} \text{ m}^3)$	0.87	1.66	1.41	0.36	
气源岩的含气饱和度/ $(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	33.68	26.64	20.16	12.99	
平均地层温度/ $^\circ\text{C}$	87	72	55	30	
平均地层压力/ $\text{MPa}$	24	19.6	15.1	8.5	
临界排气饱和度/ $(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	18.53	15.79	12.80	7.88	
排气饱和度/ $(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	15.15	10.85	7.36	5.11	
游离相排气量/ $(10^{12} \text{ m}^3)$	13.20	18.01	10.38	1.84	43.43

(3) 扩散相排气量。扩散相排气量主要取决于原始扩散浓度、扩散系数、扩散面积和扩散时间,可按不稳定扩散费克第二定理的简化公式<sup>[9]</sup>求得,其计算式如下:

$$Q_{dg} = C_0 \{ 1 - \exp[De \cdot \pi \cdot t_d (4L^2)^{-1}] \} V \tag{7}$$

表 5 第四系各层段气源岩扩散相排气量的计算参数和结果  
Table 5 The calculation parameters and results for expulsion of diffusion-phase gas of gas source rocks in Quaternary

层 段	K <sub>13</sub> —K <sub>10</sub>	K <sub>10</sub> —K <sub>5</sub>	K <sub>5</sub> —K <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> 以上	合计
平均原始扩散浓度/(10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> ·km <sup>-3</sup> )	10. 770	13. 220	13. 580	11. 440	
有效扩散系数/(10 <sup>-3</sup> km <sup>2</sup> ·Ma <sup>-1</sup> )	0. 337	0. 527	0. 716	0. 905	
平均扩散时间/Ma	2. 100	1. 700	1. 250	0. 940	
扩散层厚度之半/km	0. 090	0. 146	0. 152	0. 119	
层段扩散后的浓度/(10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> ·km <sup>-3</sup> )	8. 690	11. 920	12. 330	9. 870	
扩散相排气量/(10 <sup>12</sup> m <sup>3</sup> )	1. 200	1. 750	1. 940	1. 910	6. 830

3.3 三湖地区第四系生物气的聚集作用

3.3.1 第四系生物气聚集的相态

生物气在圈闭中若以水溶相聚集为主则称为水溶相生物气藏,简称水溶气藏;若以游离相聚集为主则称为游离相生物气藏,简称生物气藏。

三湖地区第四系生物气埋深浅于 2 000 m,属常温常压条件,且地层水盐度较高(一般平均约为 50 g/L)、气水比低(多为 0. 4~2 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>),所以很难形成工业性的水溶相生物气藏;另一方面,在第四系剖面中,泥质烃源岩平均占 75%,生气量很大,致使地层中游离相生物气的运移量 5 倍于水溶相生物气的运移量。因此,三湖地区第四系生物气是以游离相聚集为主。

3.3.2 第四系生物气聚集的动力

生物气的排出、运移与聚集是一个连续过程,可以说聚集是圈闭中的运移。因此,运移的主要动力也都是聚集的动力,只是对聚集成藏的作用有所不同。对于游离相生物气聚集来说,浮力和压实水动力是推动游离气向圈闭充注聚集的直接动力;下渗水动力和由盐度差所产生的渗透压力是间接的动力,它们主要是推动含气水运移,只有当盐度、温度、压力发生变化析出游离气后,才能在浮力作用下聚集成藏;毛细管压差主要是形成于砂、泥岩的界面上,对背斜聚气作用不明显;而分子扩散主要是由于圈闭盖层扩散系数的变化,起到相对聚集的作用<sup>[9]</sup>。

3.3.3 第四系生物气聚集的数量

这里所说的聚集量是指能为圈闭提供的聚集量,它不等于生物气全部排出的运移量,而是在第四系同生背斜定型之后排出或析出的游离气量,也称为有效排气量。根据同生背斜在 K<sub>1</sub> 定型的时期(距今 1. 35 Ma)和生气温度(20~80℃)的埋深区间,确定出各气层段有

式中: Q<sub>dg</sub> 为扩散相排气量,10<sup>12</sup> m<sup>3</sup>; C<sub>0</sub> 为平均原始扩散浓度,10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>/km<sup>3</sup>; De 为有效扩散系数,km<sup>2</sup>/Ma; t<sub>d</sub> 为扩散时间,Ma; L 为扩散层段厚度之半,km。

三湖地区第四系各层段气源岩扩散相排气量及相关计算参数见表 5。

效排气的时空范围(图 2),再利用区间所对应的深度变化求出孔隙度、温度、压力、溶解度等一系列参数,代入上述各相态运移量的计算公式,即可获得各气层段各种相态的有效排气量,即可供聚气量(表 6)。

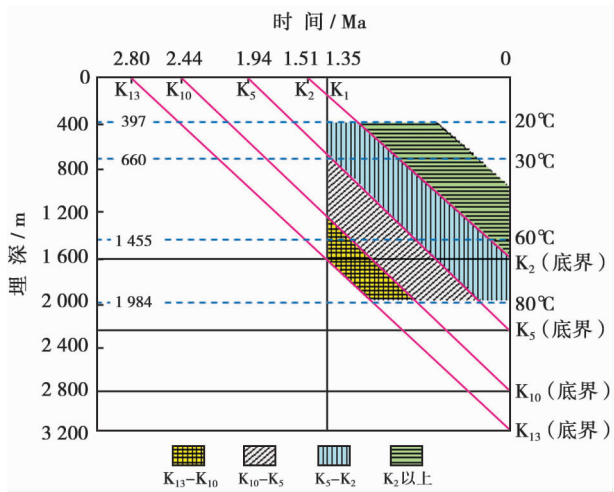


图 2 三湖地区第四系各气层段有效排气的时空范围  
Fig. 2 Space-time unique of effective gas-expulsion in Quaternary in Sanhu area

表 6 三湖地区第四系各层段的可供聚气量  
Table 6 The effective expulsion gas quantity in Quaternary of Sanhu area

层 段	K <sub>13</sub> —K <sub>10</sub>	K <sub>10</sub> —K <sub>5</sub>	K <sub>5</sub> —K <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> 以上	总计
析出的有效游离气量/(10 <sup>12</sup> m <sup>3</sup> )	0. 13	0. 47	0. 61	0. 11	1. 32
排出的有效游离气量/(10 <sup>12</sup> m <sup>3</sup> )	1. 69	6. 43	11. 15	2. 75	22. 02
相对聚集的有效扩散量/(10 <sup>12</sup> m <sup>3</sup> )	0. 99	1. 23	1. 35	0	3. 57
合 计	2. 81	8. 13	13. 11	2. 86	26. 91
所占比例/%	10. 4	30. 3	48. 7	10. 6	



## 4 三湖地区第四系生物气的成藏模式和资源量

### 4.1 第四系生物气的成藏模式

三湖地区生物气在第四系中的生成、运移和聚集属典型的自生自储,生物气藏主要是在距今 1.35 Ma 以来同生背斜定型后形成的,其成藏可概括为“自生自储、以近源垂向运聚为主、受同生圈闭控制”的模式。

#### 4.1.1 成藏动力

浮力是游离气垂向运聚的直接动力,特别是在第四系,其地层倾角一般小于 5°,浮力在上倾方向的分力很小,其侧向运移的能力只相当于垂向的 1/11;同时直径约为 0.5 μm 的分散小气泡还可以沿较大孔隙和裂隙自由上浮。其次为压实水动力。在泥质岩约占 75% 且砂、泥岩的物性差别不大的第四系中,由压实产生的侧向剩余压力梯度只约相当于垂向的 1/20<sup>[10]</sup>,说明压实水流也主要是垂向排出。

只有下渗水动力能在侧向上(由南向北)为成藏提供含气水流,其大小取决于两端高程差和压力差。据前人的研究<sup>[11]</sup>,三湖地区在第四纪早期盆山高差只有 500~1 000 m;到中晚期增大到 1 700~1 900 m;尤其是距今 0.03 Ma 以来增大到了 2 900 m,形成现今约为 1 m/km<sup>2</sup> 的南北水势梯度<sup>①</sup>。根据达西渗流公式可计算出含气水的流速,其表达式为

$$q = K(\rho/\mu) \cdot g \cdot (\Delta h/h)$$

(8)

式中:  $q$  为流速, m/a;  $K$  为渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $\rho$  为水的密度, g/cm<sup>3</sup>;  $\mu$  为水的黏度, Pa·s;  $\Delta h/h$  为水动力梯度, m/km。

根据式(8)可计算出含气水流速  $q$  为 0.32 m/a, 则 0.03 Ma 可运移 9.6 km。

若古水动力梯度取 0.1 m/km(接近西西伯利亚盆地的 0.09 m/km)<sup>[12]</sup>, 则可计算出  $q$  为 0.032 m/a, 即在成藏期 1.35 Ma 以来可运移 43.2 km。这说明下渗水流的侧向补给对生物气成藏有影响,但不是主要作用。

#### 4.1.2 运聚数量

从表 6 可知,游离相和水相析出的总有效排气量为  $23.34 \times 10^{12} \text{ m}^3$ , 平均排气强度为  $9.72 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。而侧向下渗水动力所能提供的含气水源,可由式(9)计算。

$$Q = q A t$$

(9)

其中,流速  $q$  取 0.032 m/a, 过水面积  $A$ (昆仑山前断面中砂质岩面积)取 60 km<sup>2</sup>, 时间  $t$  取 1.35 Ma, 则含

气水流量  $Q$  为  $2.59 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。若 1 m<sup>3</sup> 水可析出 1 m<sup>3</sup> 游离气,则平均 1 km<sup>2</sup> 只有  $1.08 \times 10^8 \text{ m}^3$  的气可供聚集,显然不能满足现有同生圈闭中的聚集量。可见,该区是以垂向运聚成藏为主,这也是运聚效率最高的模式。

#### 4.1.3 聚集样式和成藏过程

在该区现今生物气田中,常见有多个气层组,其中又包含着多个含气面积递减的小气藏。这种样式的成藏过程只可能解释为:垂向运聚的游离气首先在顶部较好盖层下聚集;当气-水界面达到第一储层的底面时就开始透过其间隔层进入第二个储层;如此相继在第三、第四个小而薄的储层中聚集,最终形成一个受同一背斜、同一有效封盖层控制的,由多个薄气层组成的具有统一气水界面和统一压力系统的气藏。这种样式的气藏几乎不可能是侧向分层充注聚集的结果,它充分反映了垂向运聚成藏的特征(图 3)。

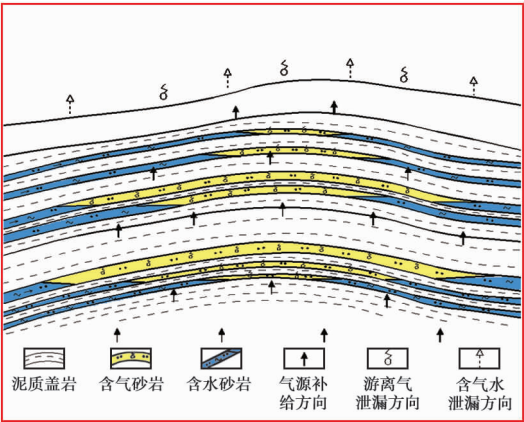


图 3 三湖地区第四系游离相生物气成藏模式  
Fig. 3 The pool-forming model of the free-phase biogas in Quaternary of Sanhu area

### 4.2 第四系生物气的资源量预测

通过定性、定量的研究可知,第四系游离相生物气成藏以垂向运聚为主,具有成藏时间短、埋藏深度浅、地层封闭性差等特征;同生圈闭是该区生物气成藏最关键的主控因素,只要有同生圈闭存在就可能有资源量或储量,否则生物气将散失地表或漫散于地层之中。因此,本次研究以定量计算的可供聚气量和同生圈闭的落实情况为依据,对该区资源量和储量进行预测。

从表 6 可知,第四系各层段的可供聚气量(有效排气量)共计  $26.9 \times 10^{12} \text{ m}^3$ , 对  $2.4 \times 10^4 \text{ km}^2$  的研究区来说平均聚气强度为  $11.21 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。根据目前勘探程度,预测该区同生圈闭的面积为 1 000 km<sup>2</sup>, 则该区的地质资源量为  $11 210 \times 10^8 \text{ m}^3$ ; 如果预计现今能落实的同生圈闭面积为 500 km<sup>2</sup>, 则该区现今的预测储

① 王明明,史占祯,李本亮,等.柴达木盆地天然气地质综合评价与预探区带优选.中国石油勘探开发研究院廊坊分院,2003.

量(三级储量)为  $5\,604\times 10^8\text{ m}^3$ 。再根据各层段的可供聚气量所占比例,可进一步评价各层段的地质资源量和三级储量(表 7)。

表 7 三湖地区第四系各层段的地质资源量和三级储量  
Table 7 Geological resources and possible reserves in Quaternary of Sanhu area

层 段	K <sub>13</sub> —K <sub>10</sub>	K <sub>10</sub> —K <sub>5</sub>	K <sub>5</sub> —K <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> 以上	合计
地质资源量/ $10^8\text{ m}^3$	1 165. 63	3 396. 02	5 458. 29	1 188. 06	11 210
三级储量/ $10^8\text{ m}^3$	582. 82	1 698. 01	2 4729. 15	594. 02	5 604

5 结 论

- (1) 第四系气源岩总生气量为  $108.81\times 10^{12}\text{ m}^3$ , 其中约有  $30\times 10^{12}\text{ m}^3$  呈水溶相,  $78\times 10^{12}\text{ m}^3$  呈游离相, 是该区形成游离相生物气藏的物资基础。
- (2) 若取最差盖层与最好储层相组合尚有 0. 025~0. 1 MPa 的排替压力差, 可封住 2~10 m 的气柱高度, 相对于研究区 1~3 m 的薄储层还是有效的。也正是在多个盖层封闭下, 由多个含气薄储层组成的大气田才得以形成。
- (3) 同生圈闭是第四系生物气成藏最关键的主控因素, 只有在下更新统 K<sub>1</sub> (距今 1. 35 Ma) 同生背斜定型之后, 排出和析出的游离气量才是可供聚集的有效排气量。
- (4) 压实水动力和浮力是游离气运聚的直接动力, 其方向主要是垂向, 可提供有效排气强度平均为  $9.72\times 10^8\text{ m}^3/\text{km}^2$ ; 下渗水动力是含气水流运移的动力, 是游离气运聚的间接动力, 其方向主要是侧向, 可提供有效排气强度平均为  $1.08\times 10^8\text{ m}^3/\text{km}^2$ 。
- (5) 该区第四系生物气可概括为“自生自储、以近源垂向运聚为主、受同生圈闭控制”的成藏模式。预测其地质资源量为  $11\,210\times 10^8\text{ m}^3$ , 三级储量为  $5\,604\times 10^8\text{ m}^3$ 。

参 考 文 献

[1] 李本亮,王明明,冉启贵,等. 地层水含盐度对生物气运聚成藏的作用[J]. 天然气工业,2003,23(5):16-20.  
Li Benliang, Wang Mingming, Ran Qigui, et al. Effect of the salinity of formation water on biogas migration, accumulation and reservoir formation [J]. Natural Gas Industry, 2003, 23 (5): 16-20.

[2] 张彭熹. 柴达木盆地盐湖[M]. 北京: 科学出版社, 1987:32-46.  
Zhang Pengxi. Salt lakes in Qaidam Basin[M]. Beijing: Science Press, 1987:32-46.

[3] 康竹林,傅诚德,崔淑芬,等. 中国大中型气田概论[M]. 北京:石

油工业出版社,2000:158-180.  
Kang Zhulin, Fu Chengde, Cui Shufen, et al. Introduction to large and medium gas fields in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000: 158-180.

[4] 孙镇城, 乔子真, 景明昌, 等. 柴达木盆地七个泉组和第四系-新近系的分界[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 422-432.  
Sun Zhencheng, Qiao Zizhen, Jing Mingchang, et al. Qigequan Formation and Quaternary-Neogene boundary in Qaidam Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(3): 422-432.

[5] 刘方槐, 颜婉荪. 油气田水文地质学原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991: 55-60.  
Liu Fanghuai, Yan Wansun. Principle of hydrogeology in oil and gas fields[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991: 55-60.

[6] 李剑, 刘成林, 谢增业, 等. 天然气资源评价[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 43-46.  
Li Jian, Liu Chenglin, Xie Zengye, et al. Evaluation on the natural gas resources [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 43-46.

[7] 翟光明. 中国石油地质志: 卷十四[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992: 225-230.  
Zhai Guangming. Petroleum geology of China: Vol. 14[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992: 225-230.

[8] 张水昌, 赵文智, 李先奇, 等. 生物气研究新进展与勘探策略[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 90-96.  
Zhang Shuichang, Zhao Wenzhi, Li Xianqi, et al. Advances in biogenic gas studies and play strategies[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(4): 90-96.

[9] 李明诚. 石油与天然气运移[M]. 第 3 版. 北京: 石油工业出版社, 2004: 44-46, 169-170, 260-268, 273-276.  
Li Mingcheng. Migration of oil and natural gas[M]. 3rd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 44-46, 169-170, 260-268, 273-276.

[10] 真柄钦次. 压实与流体运移[M]. 陈荷立, 邸世祥, 汤锡元, 等译. 北京: 石油工业出版社, 1981: 123-134.  
Magara K. Compaction and fluid migration[M]. Translated by Chen Heli, Di Shixiang, Tang Xiyuan, et al. Beijing: Petroleum Industry Press, 1981: 123-134.

[11] 吴必毫. 柴达木盆地盐湖的特征与形成机理[G]//郑绵平. 盐湖资源环境与全球变化: 第六届国际盐湖学术讨论会论文选集. 北京: 地质出版社, 1996.  
Wu Bihao. Characteristics and formation mechanism of salt lake in Qaidam basin[G]//Zheng Mianping. Resource environment of salt lake and its change of the global: Selected papers of the Sixth International Symposium on Salt Lake. Beijing: Geological Publishing House, 1996.

[12] 王明明, 李本亮, 魏国齐, 等. 柴达木盆地东部第四纪水文地质条件与生物气成藏[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(4): 341-345.  
Wang Mingming, Li Benliang, Wei Guoqi, et al. Quaternary hydrogeology condition and reservoiring of biogenic gas in eastern Qaidam basin[J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(4): 341-345.