

文章编号: 0253-9985(2009)03-0310-06

柴达木盆地第四系陆相生物气形成机理与控制因素

魏水建¹, 王金鹏², 管志强³, 徐子远³, 姜桂凤³

(1 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083 2 中国石油大学 资源与信息学院, 北京 102249

3 中国石油天然气股份有限公司 青海油田分公司 石油勘探开发研究院, 甘肃 敦煌 736202)

摘要: 柴达木盆地第四系是研究生物气的理想地点。通过对该盆地生物气形成环境及生物气产生过程模拟试验成果进行综合分析, 认为陆相生物气的形成主要受温度、菌群类型、地层水性质、沉积速率等条件的控制。甲烷菌的生存温度为 0~80℃, 最有利的产甲烷菌代谢温度为 30~55℃, 大致在 35℃ 左右开始出现产气高峰, 折算埋深在 500 m 以下。柴达木盆地第四系地层水具有高矿化度和高盐度特征, 并且由浅往深逐渐降低, 再加上浅层硫酸盐还原带的分布, 使得产甲烷菌群的活动在浅表受到抑制, 有利于在较深部位生气成藏。快速的沉积作用, 使有机质得以迅速埋藏, 为后期微生物作用提供了充足的有机质来源。

关键词: 产甲烷菌群; 陆相生物气; 第四系; 柴达木盆地

中图分类号: TE122.1 **文献标识码:** A

Genetic mechanism and controlling factors of terrestrial biogenetic gas in the Quaternary of the Qaidam Basin

Wei Shuijian¹, Wang Jingpeng², Guan Zhiqiang³, Xu Ziyuan³, Jiang Guifeng³

(1 Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083 China; 2 Faculty of Resources and Information, China University of Petroleum, Beijing 102249 China; 3 Petroleum Exploration and Development Research Institute, PetroChina Qinghai Oilfield Company, Dunhuang, Gansu 736202 China)

Abstract The Quaternary in the Qaidam Basin is an ideal site to study biogenetic gas. Based on the analysis of the forming environment of biogenetic gas and in combination with the results of modeling experiments of biogenetic gas generation, we have concluded that the generation of terrestrial biogenetic gas is under the control of various factors including temperature, bacterial group types, groundwater properties and sedimentary rates, etc. The survival temperature of bacterium which produces methane is 0–80℃, and the most favorable temperature to produce methane is 30–55℃. The peak of gas generation occurs at 35℃, which corresponds to a burial depth of 500 m. The groundwater in the Quaternary of the Qaidam Basin has the characteristics of high salinity. Its salinity decreases with the increasing of depth. In addition, there are sulfate reduction zone in the shallow strata. These factors restrain the activity of methane bacteria in the shallow and surface areas, making it favorable to generate gas in the deeper strata. The rapid sedimentation buries organic matters quickly, which provide abundant organic sources for later microbial activities.

Key words bacteria group producing methane; biogenetic gas of terrestrial facies; Quaternary; Qaidam Basin

生物气是沉积有机质在还原环境下、由厌氧微生物作用之后的代谢产物。据统计, 世界上

20% 的天然气资源为生物气^[1], 在我国生物气资源量约占全国天然气资源量的 7%^[2]。近年来, 随

收稿日期: 2008-12-15

第一作者简介: 魏水建 (1974-), 男, 高级工程师, 石油地质。

基金项目: 中国石油化工股份有限公司科研项目 (XBKT2004KY03003)。

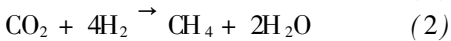
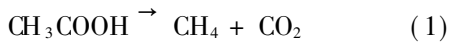
着世界经济发展对能源的需求与日俱增, 天然气在世界能源消费结构中的地位日益重要, 而生物气由于分布广、埋藏浅、成本低, 逐渐成为油气勘探开发研究的重点^[3-4]。

目前, 我国针对生物气的形成机理、成藏条件、主控因素以及资源潜力均开展了较为深入的评价研究^[5-9], 国内先后在柴达木盆地、琼东南盆地、百色盆地、陆良盆地、江浙等地发现了大规模的生物气储量, 展示了良好的勘探前景。然而, 由于生物气形成条件需要诸多地质因素的良好配置, 具有特殊性, 导致尚未对其形成机理及其控制因素进行系统研究, 使得无法对生物气资源潜力作出合理评价, 进而影响了进一步勘探开发评价。柴达木盆地第四系作为中国陆上最大的生物气田区, 探明储量近 $3\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$, 为研究陆相湖泊环境生物气形成机理和控制因素提供了极好的场所。文章以柴达木盆地第四系为解剖对象, 根据生物产气模拟实验结果, 结合沉积环境分析, 以查明生物气形成过程中的控制因素。

1 柴达木盆地具备有利菌群和细菌剖面

1.1 生物气形成机理及产甲烷菌群生存环境

生物气形成主要有两种途径: 乙酸的发酵和二氧化碳的还原。反应过程如下:



研究表明^[10-12], 这两种生气机制在柴达木盆地第四系均存在, 纵向分布上存在差异。在浅层主要以乙酸发酵生气为主, 随着埋深加大二氧化碳还原作用加强, 但受研究区第四系陆相沉积环境和气源岩分布的影响, 在第四系深层也存在乙酸的发酵生气作用。

这两种化学机制的顺利进行需要产甲烷菌群的催化作用, 而产甲烷菌群对环境非常敏感, 需要齐全且配置良好的地质环境。从微生物学角度分析, 产甲烷菌群的生存环境必须具备以下条件:

①有大量适宜的孔隙滞留水, 产甲烷菌需要在含水环境中生长, 它们在水中通过细胞壁来摄取溶

于水中的营养物质(可溶有机质和悬浮的有机质颗粒), 以完成产出甲烷的代谢过程; ②有一定的有效活动空间, 产甲烷菌个体平均大于 $1\text{ }\mu\text{m}$, 这样在气源岩中必须存在相当多的较大孔隙, 而致密的岩层势必阻碍厌氧细菌的生存与活动, 成岩早期阶段原始孔隙的大量保存, 可为产甲烷菌的生存提供有利的孔隙空间; ③由于生物气主要是通过微生物作用形成的, 对温度要求严格, 一般温度界限低于 80°C 。能满足这个温阶的地层, 通常埋深为 $2\,000\text{ m}$ 左右, 该深度以下泥岩较为致密, 目前世界上生物气多数分布在 $1\,500\text{ m}$ 以上地层。

柴达木盆地第四系形成于干旱寒冷的湖相环境^[13-14], 由于埋藏期短且时代新, 地层尚处于早成岩阶段, 固结程度极低, 异常松散, 胶结物含量低, 虽然井深 $1\,000\text{ m}$ 以下砂泥岩均已明显成层, 但是粒级较粗的粉砂岩仍很松散, 泥岩也较疏松, 岩心中的古生物壳体化石可用手很轻松地岩心剥离出来。并且地层自上而下保持了很高的含水量, 以地层孔隙度 $24\% \sim 38\%$ 、含水平均饱和度 90% 计算, 第四系单位体积岩石的平均含水量为 $22\% \sim 35\%$, 如此高的含水率使粘土有很好的可塑性, 同时也延迟了压实进程, 降低了孔隙空间的减少速率, 并为有机质被溶解提供了水介质。因此, 第四系具备了有利的产甲烷菌群的生存空间。

1.2 柴达木盆地发育良好的细菌剖面

有机聚合物被微生物降解转化成甲烷的过程, 是由种类繁多、作用各异、互为利用的细菌群体共同作用的结果, 各种微生物群体组成了一个极其复杂的厌氧微生态体系。就形成生物气而言, 柴达木盆地第四系主要包括各种水解发酵菌群、产乙酸发酵菌群和产甲烷菌群等三大菌群, 以及一定数量的硝酸盐、硫酸盐还原菌、脂肪酸、芳香族化合物降解菌。

细菌调查发现, 柴达木盆地自现代湖底淤泥直至埋深 $1\,705\text{ m}$ 的第四系泥岩中均有三大菌群存活(表 1; 图 1), 在纵向上可构成一个较为完整的细菌剖面, 说明研究区在浅表已经开始了有机质降解产甲烷的过程, 并且具有长期持续产气的能力。

表 1 柴达木盆地第四系产生物气细菌调查

Table1 Bbgas producing bacteria in theQuaternary of the Qaidam Basin

地区或井号	埋藏深度 /m	纤维分解菌 /(个· g ⁻¹)	发酵菌 /(个· g ⁻¹)	产甲烷菌
达布逊湖底	0. 05	200	400	杆菌
台南中 1 井	113. 76~ 123. 38	900~ 40	450~ 270	杆菌
涩中 6 井	528. 00	40	5 000	杆菌
涩 25 井	536. 00~ 543. 00	25	320	杆菌
涩 23 井	545. 66~ 552. 85	无	750	杆菌
涩 23 井	760. 20~ 769. 20	400	225	杆菌
涩 25 井	1 037. 20~ 1 064. 20	无	750	八叠球菌
涩中 6 井	1 056. 00	1 400	7 500	八叠球菌
涩深 1 井	1 206. 00	无	350	八叠球菌
涩 23 井	1 464. 23~ 1 473. 20	无	475	杆菌
台南 4 井	1 697. 50~ 1 697. 60	无	240	杆菌
台南 5 井	1 705. 00	450	550	杆菌
红四 1 井	1 506. 00	160	3 000	杆菌

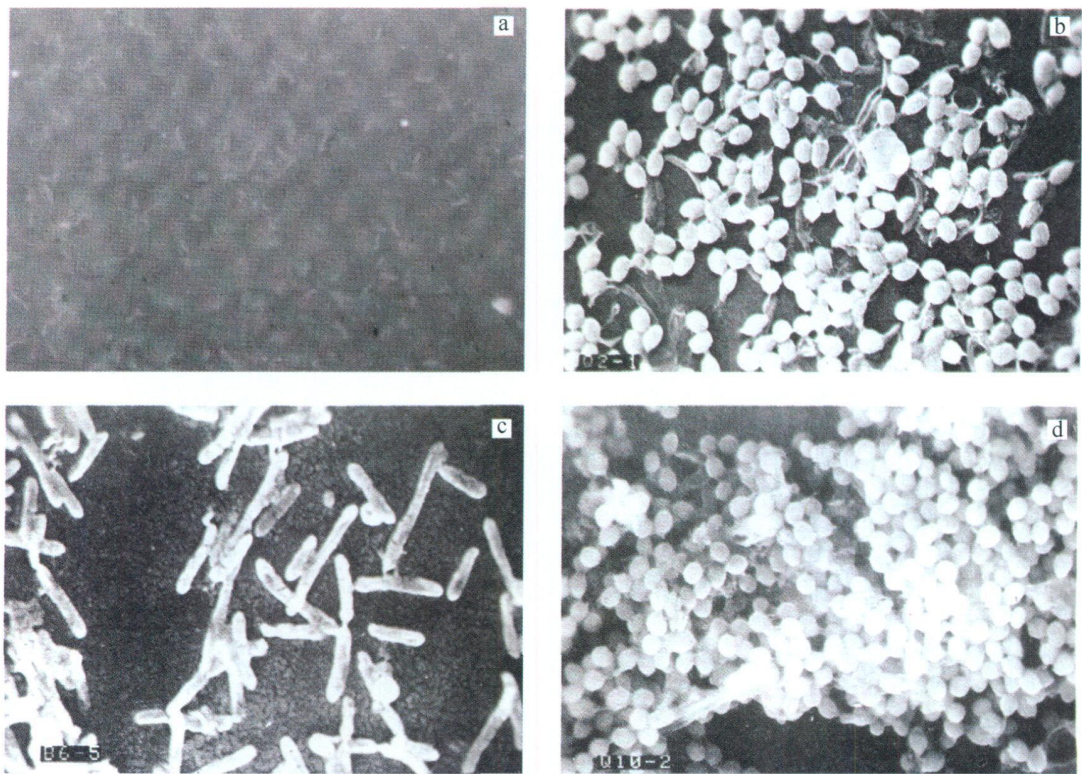


图 1 柴达木盆地第四系产甲烷菌群

Fig.1 Methane-producing bacteria in the Quaternary of the Qaidam Basin

a. 产甲烷杆菌, 涩 23 井, 1 464. 23~ 1 473. 20 m; b. 球形纤维分解菌, 311. 4l m, 台南中 1 井;
c. 厌氧发酵杆菌, 台南 4 井, 1 697. 50~ 1 697. 60 m; d. 葡萄状纤维分解菌, 台南 5 井, 1 705. 00 m

2 柴达木盆地具备有利地质条件

有机质在埋藏初期即开始了生物产气作用,

如果这种生化作用不受抑制, 沉积有机质在浅埋阶段即可被完全分解, 所生成的甲烷气也会因缺乏保存条件而散失殆尽, 丧失了资源意义。因而, 适当抑制或推延有机质的生物生气进程, 抑制产

甲烷菌群的作用,从而赋予生物气富集成藏的有利地质条件是生物气能否具有资源意义的关键和核心问题。柴达木盆地具备了生物气成藏所需的、各种地质因素巧妙配置的地质环境,其中地表面气温低、沉积速度快、浅层硫酸盐还原作用,沉积水体咸以及地层水矿化度高等是主要的抑制因素。

2.1 低温抑制浅表层产甲烷菌群作用、延迟生气进程

温度是影响甲烷菌活动的主要因素之一^[15],地质体中的甲烷菌最佳生长温度一般为 30~75℃,低温对产甲烷菌的生长起抑制作用,自然界季节性气温变化必然对甲烷产气率产生影响。如门塔多盆地沉积物在 5 月(温度为 16℃)的产气率是 1 月(温度为 4℃)的 100~400 倍,而库兹尼奇湖和切纽伊基切湖的沉积物中,甲烷产量夏季较冬季高 1~2 个数量级。在同等实验条件下,对取自海南和云南海埂的第四系暗色淤泥进行生物产气模拟实验,单位有机碳产甲烷量只有柴达木盆地第四系样品的 1/100~1/200,其原因在于海南和云南样品产自热带温暖气候环境,浅表层温度较高,造成浅表层产甲烷菌群较为活跃,生化产气的有效组分在浅表就已被大量腐解,因而实验中生气潜力很低。

柴达木盆地的第四系是低温抑制甲烷菌活动的典型。进入第四纪以来,全球性气候变冷,曾多次出现冰期,这在青藏高原表现的尤为突出。柴达木盆地第四系是在低温条件下形成的湖泊沉积。根据孢粉组合、介形等古生物化石,推测第四纪年平均温度在 3~10℃之间。现今盆地东部年平均温度为 3.7℃,而且每年至少 7 个月的冰冻期,如此的低温环境,在浅部地层中只有极少的低温型甲烷菌活动。低气温减缓浅表微生物对沉积有机质的降解速度,使产气高峰段下移。随着埋藏的不断加深,地层温度逐渐升高,甲烷菌渐渐活跃起来。

模拟实验表明(图 2),甲烷菌的生存温度为 0~80℃,温度低于 15℃时甲烷菌的产气进程相当缓慢,生成微量生物气,当环境温度高于 15℃时,生化产气进程显著加快,温度每升高 10℃,产气速度可相应地提高 2~10 倍,但产气高峰后,随着有机质的消耗,产气量降低。最有利的产甲烷菌代

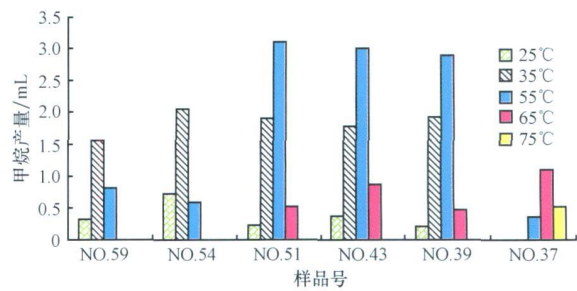


图 2 柴达木盆地第四系有机质样品在各温阶下的产甲烷差异

Fig. 2 Differences of the methane generated at different temperatures by organic matters in the Quaternary of the Qaidam Basin

谢温度为 30~55℃,大致在 35℃左右开始出现产气高峰,折算埋深在 500 m 以下,此时上覆地层已具备一定的封盖能力,有利于生物气聚集成藏。

2.2 活跃的硫酸盐还原带有利于抑制产甲烷菌群作用

硫酸盐对甲烷菌有强烈的抑制作用,处于埋藏阶段的沉积物一般都存在硫酸盐还原菌相当活跃的硫酸盐还原带。硫酸盐还原菌赖以生存的生化物质除硫酸盐以外,还有有机营养物质。其所摄取的有机营养物质不是原生有机质,而是经发酵的有机酸。由于硫酸盐还原菌的摄取能力比甲烷菌强,它们的存在无疑限制了甲烷菌的活动和繁殖。因此,甲烷的大量生成总是在硫酸盐还原带以下才会出现。

硫酸盐对产甲烷作用的抑制,还表现在对厌氧菌有明显的毒害作用。生物产气模拟实验表明,硫酸盐浓度达到 960 mg/L,便可以完全扼制厌氧菌的活动。柴达木盆地第四系硫酸根含量为 0.02%~0.25%,而地层水中硫酸根含量一般为 20~600 mg/L,最高可达 5 569 mg/L。由于硫酸根离子的普遍存在,其对甲烷菌所产生的抑制作用是不容忽视的。生物产气模拟实验表明,当岩石中硫酸盐大于 0.1%,即可对生化产气产生强烈的影响,含量越高,抑制越强烈。低于 0.1%,产气潜量则取决于沉积时间长短。由于硫酸盐抑制产甲烷菌的活动,减缓甲烷的生成和释放过程,使沉积物中有机质得以大量保存,致使模拟样品至今仍有极高的产气潜力。

根据细菌调查结果,分析第四系硫酸盐还原

菌的时空分布。11个不同深度的样品经过 50 天的 35℃恒温培养,只有台南浅层 113.76 m 样品呈现出硫酸盐还原过程(每克岩样仅 4 个硫酸盐还原菌),经过硫酸盐还原菌的生化作用,在培养试管中形成了黑色的 FeS 而取自埋深 120 m 以下的另外 10 个样品仍保持原样。由此推断,盆地第四系在 120 m 左右已基本结束了硫酸盐还原过程,而进入生化产甲烷阶段。同时,根据细菌调查结果,存在硫酸盐还原菌与产甲烷三大菌群共生的现象,说明少量的硫酸盐虽然对产甲烷菌有抑制作用,但不能完全抑制产甲烷菌的活动,只有硫酸盐及其还原菌发育过量才可危及到甲烷菌的活动。

2.3 地层水的高盐度保护了有机质生烃潜力

第四系气源岩形成于微咸水-咸水环境,不可避免地会在泥岩中形成较高的盐度。柴达木盆地第四系厌氧菌生活在高盐环境中,地层水矿化度非常高。阴离子不仅有硫酸根,而且有几乎同等浓度的碳酸氢根,一般为 100~3 000 mg/L,尤其是氯离子浓度异常的高,通常都在 50 000~150 000 mg/L。阳离子中钾、钠高达 20 000~80 000 mg/L,钙、镁相对较低。地层水总矿化度一般为 100 000~

200 000 mg/L。其中,中上更新统由于埋藏较浅,可以不断补充大气降水,总矿化度偏低,为 52 080~63 580 mg/L,而下更新统由于压实排水,地层水矿化度升高。除驼峰山稍低外,普遍均在 100 000 mg/L 以上(表 2)。

生物气模拟实验表明,岩石氯离子含量对甲烷菌有较强的抑制作用,模拟产气量较好地反映了二者之间的对应关系。图 3 说明氯离子浓度超过 1.5% 便形成了对甲烷的抑制条件。如果小于 1.5%,其产气能力则完全取决于生化作用时间的长短。据水溶盐分析资料,大致划定了气源岩盐度对产甲烷菌产生抑制的界限(图 4),岩石水溶盐含量越高,抑制作用就越强,一旦解除抑制,盐度较高的样品均有较高的产气潜量,只有当水溶盐含量小于 3.5% 时规律性消失,可见细菌已基本适应水溶盐含量小于 3.5% 的地层环境。

2.4 地层水化学性质

厌氧细菌的生存、活动与繁殖是在地层水中进行的,它们通过细胞表面的呼吸作用,吸收溶于水中的有机营养组分并排泄生化产物。因此,水介质的化学性质如 pH 值等,将影响甲烷菌的生长与繁殖。

表 2 柴达木盆地地层水矿化度统计

Table 2 Salinity statistical data of groundwater in the Qaidam basin

地区	深度 /m	样品 数量 /个	阴离子含量 /(mg·L ⁻¹)			阳离子含量 /(mg·L ⁻¹)			矿化度 / (mg·L ⁻¹)
			Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	K ⁺ + Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	
察尔汗	90.4~116.2	3	30 750~38 146	23~33	52~115	18 604~22 845	158~237	934~1 198	52 079~63 576
涩东	320.0~1 193.0	5	79 075~117 666	9~232	26~215	53 020~68 861	1 696~2 580	1 616~2 783	128 727~191 421
驼峰山	322.2~931.0	16	43 373~77 412	2~17	73~207	25 069~77 412	1 276~2 386	610~2 287	70 813~125 335
台吉乃尔	527.2~779.0	6	97 837~110 307	6~55	64~72	59 271~64 864	2 476~2 980	799~1 854	160 515~179 961
盐湖	1 385.0~1 800.0	3	102 767~116 361	405~760	57~193	55 117~59 267	5 705~11 984	1 043~1 931	168 033~189 779
涩北一号	784.6~1 464.3	13	59 987~139 185	9~5 569	91~3 211	37 518~83 450	256~3 465	143~10 258	60 370~231 074
涩北二号	569.4~1 399.4	12	58 831~132 892	11~883	73~412	34 884~77 785	1 443~5 340	623~2 562	96 270~217 749
台南	1 133.3~1 737.8	16	94 541~143 781	105~1 053	602~2 007	53 701~82 568	1 430~3 003	2 857~5 067	150 906~263 443

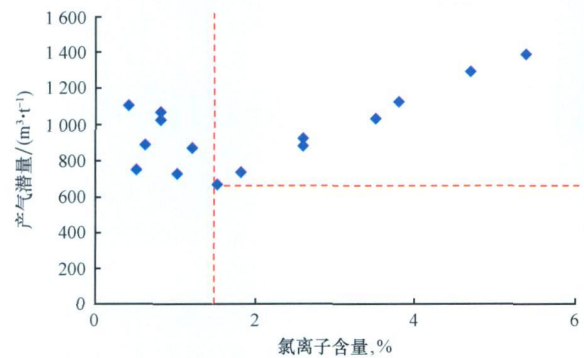


图 3 产气潜量与氯离子含量关系

Fig. 3 Relationship between gas production potential and chlorine amount

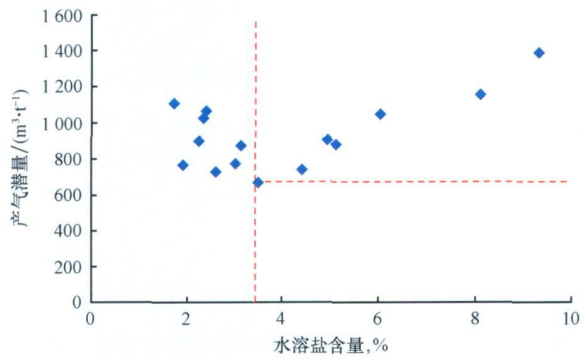


图 4 产气潜量与水溶盐含量关系

Fig. 4 Relationship between gas production potential and aqueous solution salt

生物产气模拟实验及细菌调查证实, 产甲烷菌适宜在 pH 值 6.8~7.2 的中性水介质中生长, 如果水体偏酸性或者偏碱性, 其生长活动将受到抑制。例如, 一些甲烷杆菌在水体 pH 值低于或高于 7.4 时的生长速率只相当于 pH 值等于 7.0 时的一半。据研究区第四系地层水分析资料, 本区地层水的 pH 值由浅到深由碱性渐变为偏酸性。研究区涩北二号气田在 569.4 m 处 pH 值为 7.6 到 1 367 m 深降到 7.3 至 2 000 m 以上仅有 6.3 说明由浅到深 pH 值对甲烷的抑制作用正逐步解除。这种由地层水偏碱性而形成的抑制作用同样避免了浅埋阶段有机质的无效损失, 有利于生物气的聚集成藏。

2.5 沉积速率

沉积环境研究表明, 柴达木盆地第四系沉积速率平均约每年 1 mm, 快速沉积致使第四系区域最大沉积厚度在 3 000 m 以上。快速沉积对产甲

烷的作用具有两面性: 一方面快速沉积使有机质过于分散, 造成有机质丰度偏低; 另一方面则使沉积有机质快速进入厌氧环境, 避免过长的氧化时间, 间接削弱喜氧细菌的作用强度。

由于第四纪前期盆地东部快速沉降与高速沉积的同步发展, 形成巨厚的气源岩, 有效气源岩厚度达到 800 m, 巨大的源岩厚度可弥补有机质丰度的不足。同时, 快速沉积往往在地层中形成欠压实, 造成直径 1~10 μm 的原生大孔隙较为发育, 这就为甲烷菌的生长与繁殖提供了比较充裕的有效空间, 从而加大了生化甲烷产气带的埋藏深度。

3 结论

柴达木盆地第四系影响生物气生产和富集成藏的地质因素众多而复杂, 气候、沉积、流体和构造因素互动, 通过对产甲烷菌群作用的适时抑制和催化, 控制了沉积有机质的生物生气进程, 进而控制了生物气的富集成藏过程。各种地质因素构成了时空上复杂的作用网络, 正是在这种由物理、化学和生物化学等条件组成的网络背景下, 在沉积初期, 低气温通过抑制产甲烷菌群的作用保护了有机质的产气潜力; 在进入常温带后, 硫酸盐还原菌在 100 m 埋深内抑制了甲烷菌的活动; 而在中深部, 浓缩地层水又成了主要的抑制条件, 这样便在纵向上对甲烷菌形成了一个连锁抑制, 为持续永久的生化产甲烷过程创造了条件。

参 考 文 献

1 Rice D D. Biogenic gas controls, habitats and resource potentials [A]. Howell D G, ed The future of energy gases[C]. US Geological Survey Professional Paper 1570, 1993 583-606

2 谢秋元. 我国生物气资源的开发前景 [J]. 中国地质, 1991 (1): 23~25

3 Howell D G. 能源气的未来 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1999

4 帅燕华, 张水昌, 苏爱国, 等. 生物成因天然气勘探前景初步分析 [J]. 天然气工业, 2006 26(8): 1~4

5 Shurr G W, Ridgley J L. Unconventional shallow biogenic gas system [J]. AAPG Bulletin 2002, 11(86): 1 939-1 969

6 Gole M J, Butt C R M. Biogenic thermogenic near surface gas anomaly over Gorgan and Bootine gas fields Western Australia [J]. AAPG Bulletin 1985, 12(69): 2 110-2 119

7 Rice D D, Claypool G E. Generation, accumulation, and resource potential of biogenic gas [J]. AAPG Bulletin 1981, 1(65): 5-25

4 结 论

1) 塔中地区发育多个走向的断层, 以北西向断层占主导; 断层活动时间主要集中在加里东中晚期, 海西期活动强度减小, 喜马拉雅晚期很弱; 各断裂在活动时代与期次、对沉积地层改造和建造的控制上以及上下地层接触关系上存在差异。

2) 塔中地区不同演化阶段的断裂对油气聚集控制作用不同。断裂差异演化对含油气断裂构造带上油气成藏聚集控制作用有 4 种类型, 即塔中 I 号断裂的同沉积断裂控油气、塔中 II 号断裂东段的沉积期后断裂控油气、塔中 10 井断裂带的主生烃期断裂控油气和塔中 4 构造的成藏期后断裂控油气。

参 考 文 献

1 吕修祥, 胡轩. 塔里木盆地塔中低凸起油气聚集与分布 [J]. 石油与天然气地质, 1997, 18(4): 288~ 294

2 谢晓安, 吴奇之, 高岩, 等. 塔里木盆地压扭断裂带构造特征与油气聚集 [J]. 石油学报, 1997, 18(2): 13~ 17

3 姜振学, 杨俊, 庞雄奇, 等. 塔中 4 油田 石炭系各油组油气性质差异及成因机制 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(2): 159~ 166

4 吕修祥, 赵风云, 杨海军, 等. 塔中隆起志留系混源多期油气聚集特征与勘探对策 [J]. 西安石油大学学报 (自然科学版), 2005, 20(3): 1~ 5

5 杨宁, 吕修祥, 周新源, 等. 塔里木盆地碳酸盐岩油气聚集带 [J]. 地质学报, 2006, 80(3): 398~ 405

6 王红军, 黄晓明. 塔中地区地层压力结构与油气的分布 [J]. 石油实验地质, 1999, 21(3): 242~ 245

7 赵宗举, 周新源, 范国章. 塔里木盆地塔中地区主要构造圈闭形成期分布及成藏意义 [J]. 海相油气地质, 2006, 11(2): 1~ 8

8 杨春林. 塔里木盆地压扭构造组合与油气聚集 [J]. 石油地球物理勘探, 1999, 34(6): 682~ 690

9 张振生, 李明杰, 刘社平. 塔中低凸起的形成和演化 [J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(1): 28~ 31

10 邬光辉, 李启明, 张宝收, 等. 塔中 I 号断裂坡折带构造特征及勘探领域 [J]. 石油学报, 2005, 26(1): 28~ 30

11 赵靖舟, 庞雯, 吴少波, 等. 塔里木盆地海相油气成藏年代与成藏特征 [J]. 地质科学, 2002, 37(增刊): 81~ 90

12 赵靖舟, 李启明. 塔里木盆地油气藏形成与分布规律 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003. 50~ 100

13 周新源, 王招明, 杨海军, 等. 塔中奥陶系大型凝析气田的勘探和发现 [J]. 海相石油地质, 2006, 11(1): 45~ 51

14 赵宗举, 李宇平, 吴兴宁, 等. 塔里木盆地塔中地区奥陶系特大型岩性油气藏成藏条件及勘探潜力 [J]. 中国石油勘探, 2004, 9(5): 12~ 21

15 魏国齐, 贾承造, 宋惠珍, 等. 塔里木盆地塔中地区奥陶系构造- 沉积模式与碳酸盐岩裂缝储层预测 [J]. 沉积学报, 2000, 18(3): 408~ 413

16 王飞宇, 张水昌, 张宝民, 等. 塔里木盆地寒武系海相烃源岩有机成熟度及演化史 [J]. 地球化学, 2003, 32(5): 461~ 468

17 刘克奇, 苏振阁. 塔里木盆地塔中 4 油田油气成藏条件与成藏模式 [J]. 石油大学学报 (自然科学版), 2005, 29(2): 6~ 10

18 赵靖舟, 李秀荣. 晚期调整再成藏——塔里木盆地海相油气藏形成的一个重要特征 [J]. 新疆石油地质, 2002, 23(2): 89~ 92

19 何治亮, 陈强路, 钱一雄, 等. 塔里木盆地中央隆起区油气勘探方向 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 769~ 778

20 周波, 贾承造, 顾家裕, 等. 塔中台地边缘上奥陶统灰岩段裂缝对储层发育的控制作用——以塔中 I 号断裂坡折带为例 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(2): 198~ 203

(编辑 高 岩)

(上接第 315 页)

8 Riedel M, Spence C D, Chapman N R, et al Deep sea gas hydrates on the northern Cascadia margin [J]. The Leading Edge, 2001, 1(20): 87~ 91

9 Welhan J A, Lupton J E. Light hydrocarbon gases in Guaymas Basin hydrothermal fluids: thermogenic versus abiogenic origin [J]. AAPG Bulletin, 1987, 2(71): 215~ 223

10 丁安娜, 王明明, 李本亮, 等. 生物气的形成机理及源岩的地球化学特征——以柴达木盆地生物气为例 [J]. 天然气地球科学, 2003, 14(5): 402~ 407

11 帅燕华, 张水昌, 赵文智, 等. 陆相生物气纵向分布特征及形成机理研究——以柴达木盆地涩北一号为例 [J]. 中国科学 (D

辑: 地球科学), 2007, 37(1): 46~ 51

12 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~ 95

13 党玉琪, 侯泽生, 徐子远, 等. 柴达木盆地生物气成藏条件 [J]. 新疆石油地质, 2003, 24(5): 374~ 378

14 党玉琪, 张道伟, 徐子远, 等. 柴达木盆地三湖地区第四系沉积相与生物气成藏 [J]. 古地理论, 2004, 6(1): 110~ 118

15 农业部厌氧微生物重点开放实验室. 产甲烷细菌及研究方法 [M]. 四川成都: 成都科技大学出版社, 1997. 35~ 56

(编辑 董 立)