

漠河盆地生物气形成条件及存在证据

苗忠英¹, 王晶², 潘春孚³, 何大祥⁴, 赵兴齐⁴

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

2. 中国石油新疆油田公司陆梁作业区, 新疆 克拉玛依 834000;

3. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北 廊坊 065007;

4. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102240)

摘要:生物气不仅能以常规生物气藏的形式存在, 而且还能以水合物、页岩气或煤层气等非常规形式存在, 是非常重要的天然气资源。通过分析漠河盆地微生物生存所需的温度、盐度、酸碱度、生存空间和营养底物来源等条件, 并结合微生物生命活动的证据认为: ①漠河盆地地层水盐度不高、酸碱度适中、营养底物充足, 具备微生物生命活动所需的基本条件; ②饱和烃气相色谱出现“鼓包”现象, 检测出 25-降萘烷、乙烯和丙烯, $\delta^{13}C_1$ 值小于 -60% , 以及相邻地区发现生物气等现象是该区存在生物气的证据; ③第四系受季节变换的影响, 可周期性生成乙酸发酵型原生生物气; 上侏罗统微裂缝发育段可形成 CO_2 还原型次生生物气。生物气不仅是漠河盆地重要的天然气资源类型, 也是天然气水合物潜在的气源之一。

关键词:生物气; 生存环境; 营养底物; 地球化学; 生烃模式; 漠河盆地

中图分类号: TE121.1+1

文献标志码: A

文章编号: 1672-1926(2013)03-0512-08

引用格式: Miao Zhongying, Wang Jing, Pan Chunfu, *et al.* Formation conditions and existing evidences of biogenic gas in the Mohe Basin, China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(3): 512-519. [苗忠英, 王晶, 潘春孚, 等. 漠河盆地生物气形成条件及存在证据[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(3): 512-519.]

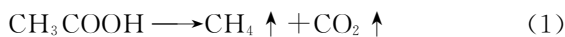
0 引言

生物气是指在自然条件下, 沉积有机质或其热演化产物在厌氧微生物的生化作用下生成的以甲烷为主, 伴生少量 N_2 和 CO_2 , 甲烷碳同位素组成较轻的一类天然气。根据与烃源岩热演化程度的匹配关系, 可分为原生生物气和次生生物气。原生生物气是指微生物利用成岩作用较弱(成岩作用早期)、热演化程度较低($R_o < 0.3\%$)的烃源岩中的可溶有机质生成的生物气; 次生生物气是指微生物利用相对高成熟($R_o > 0.3\%$)烃源岩或储层中的热成因油气生成的生物气^[1]。

无论形成哪种类型的生物气, 微生物生存所需

的基本条件都必须得到满足, 包括生存空间、温度、酸碱度、氧化还原性、盐度、营养底物等。在此基础上, 多种微生物种群联合代谢大分子有机质, 分解出的乙酸、 CO_2 和 H_2 等小分子在厌氧条件下可被产甲烷菌利用生成生物气^[2-3]。生物甲烷的形成途径主要有如下 2 种^[4-5]:

乙酸发酵:



CO_2 还原:



CO_2 还原途径形成的生物甲烷 $\delta^{13}C_1$ 值比较低, 一般为 -110% ~ -60% , δD_1 值比较高, 一般为 -250% ~ -170% ; 乙酸发酵途径形成的生物甲烷

收稿日期: 2012-11-29; 修回日期: 2013-01-21.

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41202100); “天然气水合物资源勘查与试采工程”国家专项(编号: GZHL20110322)联合资助。

作者简介: 苗忠英(1982-), 男, 吉林通化人, 博士后, 主要从事常规与非常规天然气藏形成机理及分布规律研究。

E-mail: zhymiao@foxmail.com.

$\delta^{13}\text{C}_1$ 值比较高,一般在 $-65\text{‰} \sim -50\text{‰}$ 之间, δD_1 值比较低,一般为 $-400\text{‰} \sim -250\text{‰}$ ^[5]。

目前已发现的生物气,储层时代最老的为美国密执安盆地泥盆系 Antrim 页岩,我国的上石炭统和二叠系也有发现,主要的储集层集中在白垩系、古近系、新近系和第四系^[4,6-12]。生物气一般形成于1500m以浅的地层中,个别地区也可能超过该深度,例如我国柴达木盆地台吉1井1750m左右依然产生生物气^[13],涩南1井在2480~2830m井段也有生物气显示^[6];意大利北部波河盆地生物气的最大埋深可达4500m^[14]。

地球上分布广泛的生物气既可作为特殊的资源被开发和利用,也可作为形成天然气水合物的特殊气源。天然气水合物是一种新兴的潜在能源,它是水分子在结晶过程中捕获气体分子而形成的,在自然界中主要赋存于海底、极地或高海拔等低温高压区域。陆域上,俄罗斯西西伯利亚第四系、美国阿拉斯加北坡古近系—新近系 Sagavanirktok 组均发现以生物气为气源的水合物^[15-16]。漠河盆地分布有大面积永久冻土,是我国天然气水合物的潜在分布区。然而,受自然地理条件和复杂地质背景的限制,目前该盆地的勘探程度很低,烃类气体来源问题一直悬

而未决,这严重制约着水合物勘探目标的选择。与热成因气相比,生物气的生成不受地质时间的制约,所以它与冻土形成期匹配形成水合物的概率较大,是水合物非常重要的气源之一。本文将探讨研究区生物气的形成条件及其存在证据:一方面可以为该区域寻找新型天然气资源提供依据;另一方面可以为选择水合物勘探目标提供参考。

1 地质背景

漠河盆地位于黑龙江省西北部,地理坐标为 $\text{N}52^{\circ}17' \sim \text{N}53^{\circ}39'$, $\text{E}121^{\circ}22' \sim 125^{\circ}53'$,面积约为 $2.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1),包含有洛古河拗陷、阿木尔拗陷、腰站拗陷、额木尔河推覆体和二十二站隆起共5个二级构造单元。盆地的基底由前三叠纪结晶变质岩和前寒武纪花岗岩组成,地层层序自下而上可划分为上侏罗统绣峰组、二十二站组、漠河组、开库康组,下白垩统塔木兰沟组、上库力组、依列克得组,新近系金山组和第四系。沉积盖层体现了下部为侏罗系陆相煤系地层,上部为白垩系火山岩地层的二元结构特点。白垩系火山岩主要分布在图强凹陷、蒙克山凹陷和长纓断陷南部,其他区域多为上侏罗统与第四系直接接触。上侏罗统岩性和分层特征见表1。

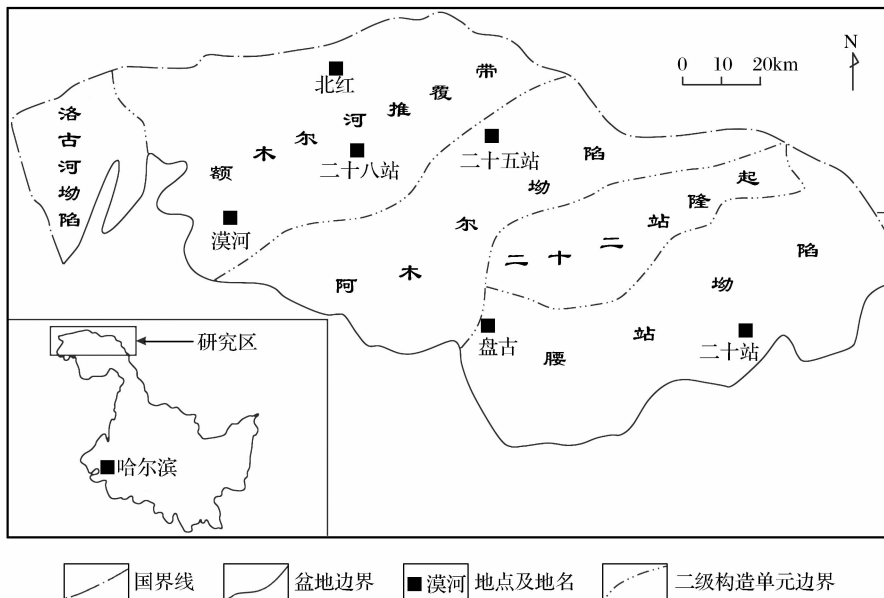


图1 漠河盆地地理位置及构造单元划分

2 漠河盆地生物气形成条件

2.1 微生物的生存环境

2.1.1 温度条件

模拟实验表明,产甲烷菌的生存温度为 $0 \sim$

80°C ,最有利的产甲烷菌代谢温度为 $30 \sim 55^{\circ}\text{C}$,大致在 35°C 左右开始出现产气高峰^[17]。漠河盆地永久冻土的埋深约为100m,地温梯度约为 $2.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。理论上在多年冻土层之下产甲烷菌的生存深度约为 $100 \sim 4100\text{m}$,有利于产甲烷菌生命活动的深度段约

表 1 漠河盆地上侏罗统地层特征

界	系	统	组	厚度/m	岩性	化石类型
中生界	侏罗系	上侏罗统	开库康组	0~2 734	灰色、黄褐色和灰黑色砂岩,长石英砂岩,岩屑石英砂岩,含砾砂岩及粉砂质泥岩夹煤线	含有植物化石
			漠河组	1 946~3 980	下部以中细砂岩、粗砂岩为主夹砾岩、粉细砂岩及泥质页岩;上部以中细砂岩与粉砂岩、炭质页岩、泥质页岩互层夹粗砂岩及煤层	产腹足类、介形类、植物和孢粉化石
			二十二站组	800~4 401	灰黑色、灰绿色粉、细、中、粗粒长石岩屑砂岩、泥质粉砂岩互层为主,局部夹含砾砂岩、砾岩、泥岩及煤线	产双壳类、介形类、植物和孢粉化石
			秀峰组	837~2 806	上部、下部以砾岩、砾岩夹细砂岩为主,中部以岩屑长石砂岩,夹砂质凝灰岩及煤线	产植物和孢粉化石
基底				前三叠纪结晶变质岩,前寒武纪花岗岩		

为 1 600~2 850m,在深度为 1 850m 左右时产甲烷菌的活性最高。在多年冻土层之上,受季节性温度变化和地形的影响,每年在 5~9 月地表温度最高,有利于产甲烷菌的生存;同一时间阳坡接受太阳辐射的能量高于阴坡,产甲烷菌生存的温度条件相对更好。密西西比河三角洲平原沉积物表层随春、夏 2 季气温升高甲烷含量增加的现象^[18],也说明较高的大气温度对第四系浅表层产甲烷菌的生命活动具有积极的影响。

2.1.2 微生物的生存空间类型

微生物的大小一般为 1~10 μm ^[19],只有生存空间大于该值才能保证维持其正常的生命活动。正常的泥页岩原生孔隙空间大小平均为 1~3nm,比微生物的体积小 5~6 个数量级,不能提供微生物正常生命活动所需的场所。但是,如果泥页岩受构造活动影响,发生抬升、挤压或拉伸而产生大量的微裂缝,则可为微生物的生存提供最基本的空间条件。漠河盆地上侏罗统的泥岩或泥质粉砂岩在逆冲推覆构造活动的作用下,产生了大量微裂缝,它们被方解石或是黄铁矿等部分充填或未被充填,为微生物提供了生存空间。常规的油气储层或是第四系沉积物的孔隙空间较大,例如柴达木盆地第四系储层主要岩性为细砂岩、粉砂岩到泥质粉砂岩,其孔隙度一般为 25%~41%^[9],能够为微生物提供生存空间。所以,泥页岩中的微裂缝、第四系原生孔隙以及常规砂岩储层中的孔隙是漠河盆地微生物生存空间的主要类型。

2.1.3 地下水的化学特征

地下水的酸碱度、氧化还原电位和盐度是影响微生物生存的主要因素。大部分产甲烷菌能够在 pH 值为 5.9~8.8 的地层水中生存,pH 值在 7.0 左右时产甲烷菌的生长速度最快,当 pH 值低于 5.9 或高于 8.8 时,产甲烷菌生长和甲烷的产率都会受到明显影响,甚至会出现产甲烷菌中毒现象^[19]。漠

河盆地的地下水分为 2 类:一是储集于第四系松散沉积物中的孔隙水;二是储集于沉积岩中的裂隙水。前者的 pH 值为 6.0~7.1,平均为 6.5;后者的 pH 值为 7.4~8.0,平均为 7.7^[20]。可见,这 2 类水的酸碱度都适合微生物的生存。

产甲烷菌是专性厌氧微生物,生存在还原环境中。漠河盆地上侏罗统漠河组的微裂缝中多见黄铁矿充填,说明环境的氧化还原电位较低、还原性较强,利于产甲烷菌生存。第四系沉积物浅表层好氧微生物分解有机质、消耗氧气,沉积物 5cm 之下氧气即可被耗尽^[21],随着深度增加环境的还原性增强,也能够适合产甲烷菌的生存。

此外,由于硫酸盐还原菌摄取 H_2 和乙酸的能力强于产甲烷菌,所以海水和咸水湖泊等 SO_4^{2-} 浓度较高的环境中,产甲烷菌的生命活动受到抑制。高 SO_4^{2-} 浓度的地层水,表现为高盐度。漠河盆地地下水盐度小于 1%^[22],所以地层水 SO_4^{2-} 浓度非常低,适合产甲烷菌生存。

2.2 微生物生命活动的营养底物

2.2.1 第四系有机质

漠河盆地地处大兴安岭北端,地表几乎全被森林、沼泽和草地所覆盖,其上承载着麋鹿、棕熊、野猪、丹顶鹤等大量野生动物。植物的枯枝落叶和动物的生命活动为第四系提供了丰富的有机质。溶解于水中的有机碳含量可达 20~47mg/L,封闭的沼泽水中有机碳含量更高^[23]。这些水溶性有机碳是产甲烷菌生命活动的重要营养底物。

2.2.2 沉积岩中的有机质

沉积岩中的原始有机质随着地层沉降埋深增加而逐渐进入成熟阶段,生成热成因的油气。当达到“排烃门限”以后,部分油气发生初次运移进入储层,在圈闭和保存条件适宜的条件下可富集成藏;另一部分油气则残留在烃源岩中。

无论是富集于储层中,还是残留于烃源岩中的油气,在适合微生物生存的条件下都可作为营养底物而被降解。例如,我国辽河油田西部凹陷^[24]和准噶尔盆地西北缘^[25]的稠油是生物降解成因;吐哈盆地雁木西油田^[26]的天然气、松辽盆地北部^[27]和莺歌海盆地^[28]浅层的天然气具生物降解特征;安徽新集、山西李雅庄和云南恩洪的煤层气是微生物降解残留于烃源岩中的有机质形成的次生生物气^[8]。

模拟试验表明:厌氧条件下,液态烃被微生物降解可形成以甲烷、CO₂和N₂为主的气体,这类气体的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值为 $-87\text{‰} \sim -50\text{‰}$,具生物气特征^[29]。Parkers^[30]研究也表明:一些细菌能将液态烃降解为甲烷,只是速率相当缓慢。在低于56℃的温度条件下,细菌可将湿气转变成甲烷和CO₂^[1]。

漠河盆地目前还未发现工业性油气藏,所以遭

受生物降解的稠油和天然气还无从谈起。但是,漠河盆地漠河组烃源岩有机质丰度相对较高、埋藏相对较浅、微裂缝发育,且烃源岩已经热演化至高成熟阶段,所以至少分布于烃源岩微裂缝中的残留吸附烃可以作为产甲烷菌的营养底物。

3 微生物活动的地球化学证据

3.1 氯仿沥青“A”具生物降解特征

漠河盆地井下460m以浅的烃源岩样品氯仿沥青“A”中非烃和沥青质含量相对较高,为36%~70%,平均为54%;饱和烃含量相对较低,饱芳比为1.5~7.0,平均为4.1;饱和烃气相色谱均出现“鼓包”现象(图2);生物标志化合物中检测出17 α (H),21 β (H)-25降藿烷(图3)。这些特征说明:残留于烃源岩中的饱和烃可能遭受过生物降解作用。

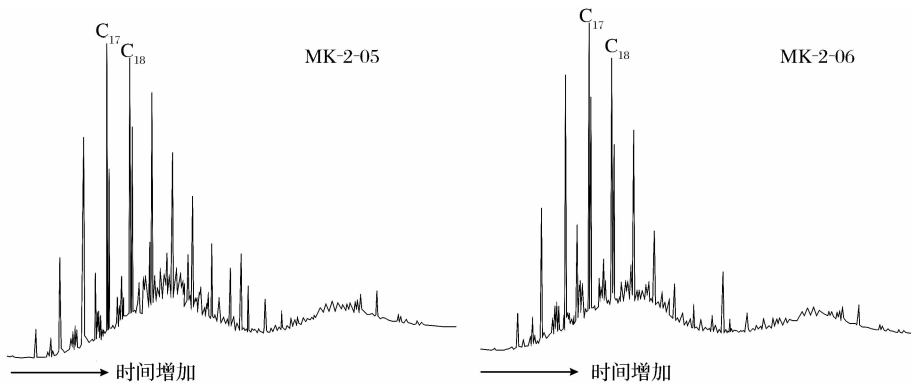


图2 漠河盆地漠河组氯仿沥青“A”饱和和烃气相色谱图

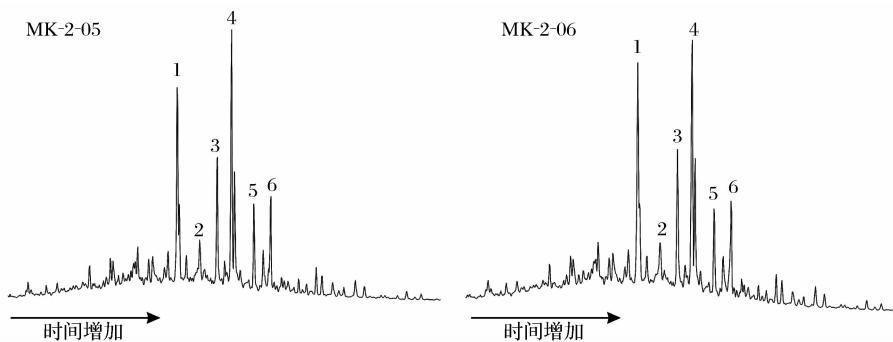


图3 漠河盆地漠河组烃源岩中降藿烷系列质量色谱图(m/z 177)

1为17 α (H),21 β (H)-25,30-二降藿烷;2为17 β (H),21 α (H)-25,30-二降莫烷;3为17 α (H),21 β (H)-25降藿烷;
4为17 α (H),21 β (H)-30-降藿烷;5为17 β (H),21 α (H)-30-降莫烷;6为17 α (H),21 β (H)-藿烷

3.2 部分天然气具生物成因气特征

帅燕华等^[31]在研究柴达木盆地东部三湖地区涩北一号气田新涩3-4井生物气纵向分布特征及形成机理中指出,烯烃的存在是产甲烷菌目前仍然比较活跃的证据。本文实验测试结果显示:天然气中乙烯和丙烯的相对含量大于 0.1×10^{-6} 的样品分别

有100件和175件;在这些样品中,乙烯和丙烯相对含量的主峰都在 $(1.0 \sim 5.0) \times 10^{-6}$ 之间(图4)。乙烯和丙烯含量在 $(0.1 \sim 1.0) \times 10^{-6}$ 之间的样品分别占18.0%和31.4%,大于 5.0×10^{-6} 的样品分别占40.0%和18.8%。这些烯烃的存在,有可能是微生物活动所致。

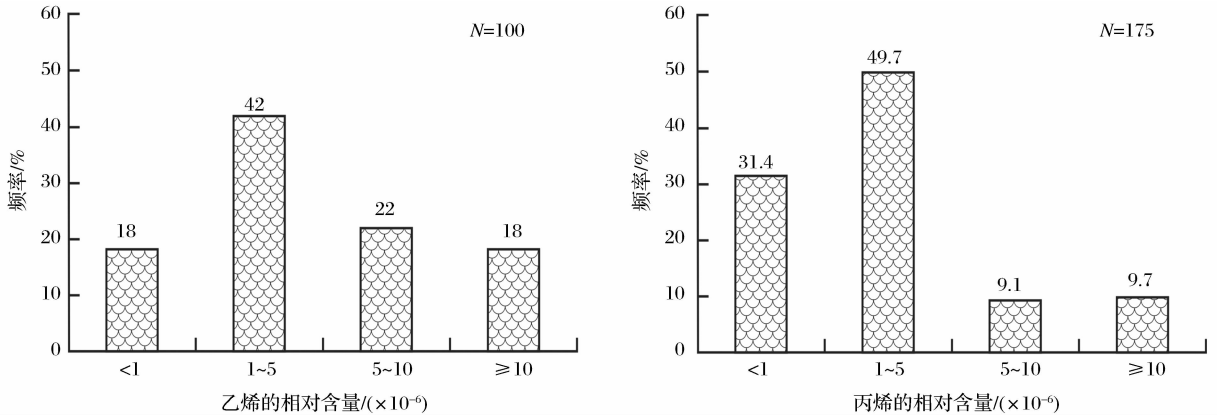


图 4 漠河盆地天然气中烯烃含量特征

赵省民等^[22]对漠河盆地 11 件泉水溶解气和 10 件岩心吸附气进行了烃类气体碳同位素分析,结果显示:泉水溶解气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值为 $-79\text{‰} \sim -64\text{‰}$,个别岩心吸附气 $\delta^{13}\text{C}_1 < -55\text{‰}$,具生物成因气的特征。

漠河盆地延伸至俄罗斯境内的部分被称为上阿穆尔盆地。该盆地冻土层厚度约为 70m,在 20~300m 井段有天然气喷出,气体组分以甲烷为主,含量可达 94%,还含有少量的 N_2 、Ar 和 He,初步确认为生物成因气^[15]。

4 讨论

为了方便讨论漠河盆地生物气的成因,综合生物气与烃源岩热演化程度的匹配关系及其形成途径,将生物气分为乙酸发酵型原生生物气、 CO_2 还原型原生生物气、乙酸发酵型次生生物气和 CO_2 还原型次生生物气。这样做一方面可以指明生物气与烃源岩的关系,另一方面也能说明它的形成途径。

4.1 生物气的成因类型

漠河盆地富有机质沉积岩的成熟度较高,例如,漠河组烃源岩已经达到高成熟阶段,干酪根镜质体反射率多已大于 1.0%,所以它即使能形成生物气也应全都是次生生物气。这类生物气的生成是由于富有机质地层被抬升剥蚀,产生大量微裂缝,大气降水携带微生物渗入其中,微生物首先将热成因大分子有机质发酵,转化为小分子有机质,同时环境由氧化态转为还原态,产甲烷菌利用小分子有机质生成甲烷。次生生物气多为 CO_2 还原成因,例如淮南潘集、张集煤矿以及密执安盆地 Antrim 页岩中的次生生物气都是 CO_2 还原型^[7,32]。漠河盆地岩石裂隙水显弱碱性^[20],裂隙中见方解石充填,说明 CO_2 供应充足,所以该区若形成次生生物气,则通过 CO_2 还原途径生成的可能性更大。

第四系为松散的沉积物,有机质成熟度较低,可形成原生物气。柴达木盆地第四系已经形成工业性生物气藏^[33-35],杭州湾地区第四系浅层也见到大量的生物气显示^[36]。Whiticar^[5,37]的研究认为,陆相浅层(深度小于 2m)淡水环境主要产乙酸发酵型原生物气,这类生物气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值一般为 $-65\text{‰} \sim -50\text{‰}$, δD_1 值一般为 $-400\text{‰} \sim -250\text{‰}$ 。但是也有乙酸发酵型生物气甲烷碳同位素值低于 -60‰ 的报道,且有甲烷氢同位素为佐证^[31]。漠河盆地河水含有较高的有机质,溶解有机碳含量为 20~47mg/L,明显高于世界河流均值 2~10mg/L,封闭的沼泽水中溶解有机碳含量更高^[23],所以地表水较低的 pH 值可能是溶解有机酸所致。据此推断,尽管泉水溶解气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值低于 -60‰ ,但是应为乙酸发酵型原生物气。

4.2 生物气的形成模式

漠河盆地第四系的厚度约为 0~8m,具二元结构。上层为季节性融溶层,厚度为 0~2.3m;下层为永久冻土层,厚度为 0~7.4m^[38]。冬季上、下层合二为一,全部冻结。如图 5 所示,第四系顶部厚度 10cm 左右为微生物耗氧带,好氧微生物在该作用带内将有机质分解成小分子,并使沉积物中含氧量迅速降低,向深处逐渐转变为还原环境,利于厌氧产甲烷菌生成生物甲烷。大气降水渗入第四系,溶解生物成因甲烷后沿融溶层从高处向低处流动,在山脚处以泉水的形式出露地面,其中所携带的生物气一部分逸散到大气中,另一部分溶解于泉水中。部分溶解生物气的大气降水可沿构造裂缝渗入到永久冻土层,受永冻层降温的影响,水分子结晶成冰的过程中可形成天然气水合物。

沉积岩层从上至下可分为微裂缝发育段,泥质盖层段,碎屑岩储层段和泥质烃源岩段。微裂缝发育段的厚度可达 1 600m,岩性为各类碎屑岩或是

煤,顶部为永久冻土带。大气降水沿断裂渗入到微裂缝发育段,携带的细菌以微裂缝中已经存在的热成因烃类为营养底物,通过一系列生化反应形成次生生物气。在永久冻土带形成之前或是形成过程中生成的次生生物气被水分子捕获形成水合物的概率较大。在永久冻土带形成之后生成的次生生物气多

以冻土带作为盖层,形成常规的次生生物气藏;也可由大地热流量升降变化引起永久冻土带中水分子周期性融化冻结而形成水合物。这类次生生物气也可以被裂缝发育段地层吸附,形成页岩气或是煤层气。在微裂缝发育段之下,可由泥岩—砂岩—泥岩构成生储盖组合,形成常规油气藏。

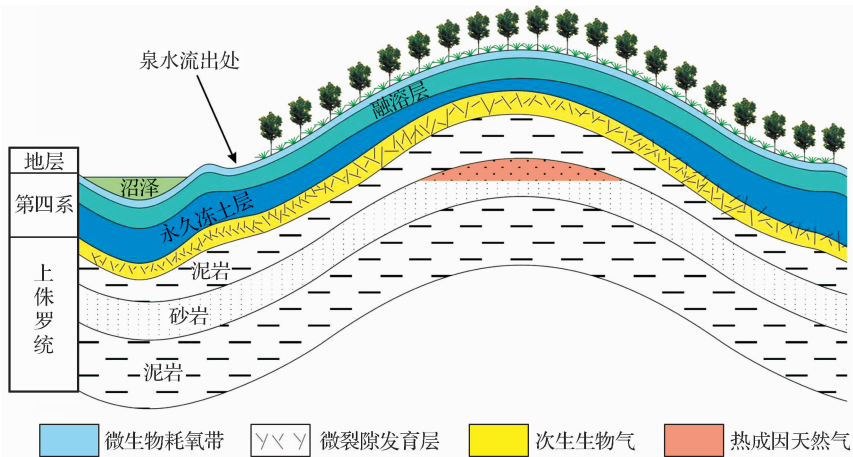


图5 漠河盆地生物气生成模式示意(第四系的地层厚度被放大)

5 结论

(1)漠河盆地第四系及其下伏沉积岩层能够为微生物的生命活动提供生存空间、营养底物,且地下水化学和地层温度条件适合微生物的生存,具备形成生物气的基本条件。氯仿沥青“A”饱和烃气相色谱特征、25-降萘烷系列的检出、天然气组分和同位素特征等是研究区微生物活动过的有利证据。

(2)通过地下水酸碱度、裂隙矿物充填以及天然气地球化学特征等推断,第四系以生成乙酸发酵型原生生物气为主,下伏沉积岩层以生成 CO_2 还原型次生生物气为主。

(3)原生生物气多已散失到大气中,部分残留于第四系,还有一部分随大气降水渗入到永久冻土带形成天然气水合物。次生生物气既能够以永久冻土带为盖层形成常规次生生物气藏,也能够以水合物、页岩气或煤层气等非常规形式出现。所以,在漠河盆地寻找以生物气为气源的天然气资源具有很广的勘探前景。

参考文献(References):

[1] Scott A R, Kaiser W R, Ayers W B. Thermogenic and secondary biogenic gases, San Juan Basin, Colorado and New Mexico—Implications for coalbed gas producibility[J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(8): 1186-1209.

[2] Ding Anna, Wang Mingming, Li Benliang, *et al.* Biogas forming mechanism and geochemical characteristics of its source rock[J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(5): 402-407. [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.]

[3] Lin Chunming, Li Yanli, Qi Binwen. Research status and exploration potential of biogenic gas[J]. Journal of Palaeogeography, 2006, 8(3): 317-330. [林春明, 李艳丽, 漆滨汶. 生物气研究现状与勘探前景[J]. 古地理学报, 2006, 8(3): 317-330.]

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

[5] Whiticar M J, Faber E, Schoell M. Biogenic methane formation in marine and freshwater environment; CO_2 reduction vs. acetate fermentation—Isotope evidence[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1986, 50(5): 693-709.

[6] Wei Guoqi, Liu Delai, Zhang Ying, *et al.* Formation mechanism, distribution feature and exploration prospect of the Quaternary biogenic gas in Qaidam Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(4): 84-89. [魏国齐, 刘德来, 张英, 等. 柴达木盆地第四系生物气形成机理、分布规律与勘探前景[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 84-89.]

[7] Martini A M, Walter L M, Ku T C W, *et al.* Microbial production and modification of gases in sedimentary basins: A geochemical case study from a Devonian shale gas play, Michigan Basin[J]. AAPG Bulletin, 2003, 87(8): 1355-1375.

[8] Tao Mingxin, Wang Wanchun, Xie Guangxin, *et al.* Secondary biogenic coalbed gas in some coal fields of China[J]. Chinese

Science Bulletin, 2005, 50(supplement 1): 24-29.

- [9] Li Mingcheng, Li Jian, Zhang Fengmin, *et al.* Quantitative research on biogas migration-accumulation and pool-forming in the Quaternary of Sanhu area in Qaidam Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(6): 809-815. [李明诚, 李剑, 张凤敏, 等. 柴达木盆地三湖地区第四系生物气运聚成藏的定量研究[J]. 石油学报, 2009, 30(6): 809-815.]
- [10] Guo Zeqing, Li Benliang, Zeng Fuying, *et al.* Distribution characteristics and reservoir formation conditions of the biogenetic gas[J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(3): 407-413. [郭泽清, 李本亮, 曾富英, 等. 生物气分布特征和成藏条件[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(3): 407-413.]
- [11] Guan Zhiqiang, Xia Bin, Lv Baofeng. Elementary factors and their configuration of biogas accumulation in eastern Qaidam Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(2): 165-170. [管志强, 夏斌, 吕宝凤. 柴达木盆地三湖地区生物气成藏基本要素及其配置性[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(2): 165-170.]
- [12] Gao Yang, Jin Qiang, Shuai Yanhua, *et al.* Genetic types and accumulation conditions of biogas in Bohaiwan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(3): 407-414. [高阳, 金强, 帅燕华, 等. 渤海湾盆地生物气成因类型与成藏条件[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(3): 407-414.]
- [13] Zhang Xiaobao, Duan Yi, Zhou Shixin, *et al.* Geological and geochemical evidences of the Tertiary biogenic gas in Qaidam Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(2): 39-41. [张晓宝, 段毅, 周世新, 等. 柴达木盆地第三系生物气的地质地球化学证据[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(2): 39-41.]
- [14] Mattavelli L, Ricchiuto T, Grignani D, *et al.* Geochemistry and habitat of natural gases in Po Basin, northern Italy[J]. AAPG Bulletin, 1983, 67(12): 2239-2254.
- [15] Yakushev V S, Chuvilin E M. Natural gas and gas hydrate accumulations within permafrost in Russia[J]. Cold Regions Science and Technology, 2000, 31(3): 189-197.
- [16] Lorenson T D, Collett T S, Hunter R B. Gas geochemistry of the Mount Elbert gas hydrate stratigraphic test well, Alaska North Slope; Implications for gas hydrate exploration in the Arctic[J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28(2): 343-360.
- [17] Wei Shuijian, Wang Jinpeng, Guan Zhiqiang, *et al.* Genetic mechanisms and controlling factors of terrestrial biogenetic gas in the Quaternary of the Qaidam Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(3): 310-315. [魏水建, 王金鹏, 管志强, 等. 柴达木盆地第四系陆相生物气形成机理与控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(3): 310-315.]
- [18] Ronald D D, Christopher J S, William H P J. Methane production in Mississippi River deltaic plain peat[J]. Organic Geochemistry, 1986, 10(4): 193-197.
- [19] Zehnder A J B, Wuhrmann K. Physiology of a Methanobacterium strain AZ[J]. Archives of Microbiology, 1977, 111(3): 199-205.
- [20] Yuan Haiyi, Liu Xuekui. Permafrost Characteristic and the exploitation and utilization of ground water in Hanjiayuan area, Da Hinggan Ling[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1993, 15(2): 242-245. [元海义, 刘学奎. 大兴安岭韩家园地区多年冻土特征及其地下水的开采和利用[J]. 冰川冻土, 1993, 15(2): 242-245.]
- [21] Zhang Yigang, Chen Huanjiang. Concepts on the generation and accumulation of biogenic gas[J]. Oil & Gas Geology, 1983, 4(2): 160-170. [张义纲, 陈焕疆. 论生物气的生成和聚集[J]. 石油与天然气地质, 1983, 4(2): 160-170.]
- [22] Zhao Xingmin, Deng Jian, Li Jinping, *et al.* Gas hydrate formation and its accumulation potential in Mohe permafrost area, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(9): 1536-1550. [赵省民, 邓坚, 李锦平, 等. 漠河多年冻土区天然气水合物的形成条件及成藏潜力研究[J]. 地质学报, 2011, 85(9): 1536-1550.]
- [23] Geng Weihua, Yang Naifeng, Ma Xiaoyang. The preliminary classification of geochemical sub landscape types in the forest-swamp area of Heilongjiang Province[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2006, 30(4): 293-297. [耿卫华, 杨乃峰, 马晓阳. 黑龙江森林沼泽区地球化学亚景观类型划分[J]. 物探与化探, 2006, 30(4): 293-297.]
- [24] Xiong Yongqiang, Geng Ansong. Carbon isotopic composition of individual compounds of asphaltene pyrolysates from biodegraded crude oils in Liaohe Basin[J]. Geochimica, 1998, 27(6): 532-536. [熊永强, 耿安松. 辽河油田生物降解原油沥青质热解产物中单体化合物碳同位素组成[J]. 地球化学, 1998, 27(6): 532-536.]
- [25] Wang Yutao. Characteristics of heavy oil biodegradation in the northwestern margin of Junggar Basin[J]. Acta sedimentologica sinica, 1994, 12(1): 81-88. [王屿涛. 准噶尔盆地西北缘稠油生物降解特征[J]. 沉积学报, 1994, 12(1): 81-88.]
- [26] Gao Gang, Huang Zhilong, Liang Hao, *et al.* Analysis on selectivity biodegradation of natural gas in Yanmuxi Oilfield of Tuha Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(4): 494-498. [高岗, 黄志龙, 梁浩, 等. 吐哈盆地雁木西油田天然气的选择性生物降解作用[J]. 石油学报, 2008, 29(4): 494-498.]
- [27] Shuai Yanhua, Song Nana, Zhang Shuichang, *et al.* Gas of biodegradation origin and their pooling characteristics in northern Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(5): 659-670. [帅燕华, 宋娜娜, 张水昌, 等. 松辽盆地北部生物降解成因气及其成藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(5): 659-670.]
- [28] Pan Xianzhuang, Zhang Guohua, Huang Baojia, *et al.* Biodegradation and mixed sources of shallow gasfields in Yinggehai Basin[J]. China Offshore Oil and Gas: Geology, 2002, 16(3): 189-195. [潘贤庄, 张国华, 黄保家, 等. 莺歌海盆地浅层天然气生物降解及混源特征[J]. 中国海上油气: 地质, 2002, 16(3): 189-195.]
- [29] Li Mingzhai, Zhang Hongnian, Liu Hua, *et al.* Advances in simulated test of biogas[J]. Oil & Gas Geology, 1996, 17(2): 117-122. [李明宅, 张洪年, 刘华, 等. 生物气模拟试验的进展[J]. 石油与天然气地质, 1996, 17(2): 117-122.]

- [30] Parkes J. Cracking anaerobic bacteria[J]. *Nature*, 1999, 401: 217-218.
- [31] Shuai Yanhua, Zhang Shuichang, Zhao Wenzhi, *et al.* Longitudinal distributions of two formation pathways of biogenic gases in continental deposits: A case study from Sebei 1 Gasfield in the Qaidam Basin, western China[J]. *Science in China: Series D*, 2007, 50(2): 221-227. [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*, 2007, 37(1): 46-51.]
- [32] Zhang Xiaojun, Tao Mingxin, Wang Wanchun, *et al.* Geochemical behaviors of secondary biogas in Panji and Zhangji coal mines in Huainan Coal Field[J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(7): 34-38. [张小军, 陶明信, 王万春, 等. 淮南潘集、张集煤矿次生物气地球化学特征[J]. *天然气工业*, 2008, 28(7): 34-38.]
- [33] Xu Ziyuan, Xie Li, Zhang Daowei, *et al.* Exploration courses and reserves state of Quaternary biogas in Qaidam Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2005, 26(4): 437-440. [徐子远, 谢丽, 张道伟, 等. 柴达木盆地第四系生物气的勘探历程与储量现状[J]. *新疆石油地质*, 2005, 26(4): 437-440.]
- [34] Zhang Xiang, Ji Zonglan, Yang Yinshan, *et al.* The discussion upon sealing mechanism of Quaternary cap rock in Qaidam Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2004, 15(4): 383-386. [张祥, 纪宗兰, 杨银山, 等. 试论柴达木盆地第四系盖层的封盖机理[J]. *天然气地球科学*, 2004, 15(4): 383-386.]
- [35] Li Xianqi, Zhang Shuichang, Zhu Guangyou, *et al.* Types and research direction of biogenic gas in China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2005, 16(4): 477-484. [李先奇, 张水昌, 朱光有, 等. 中国生物成因气的类型划分与研究方向[J]. *天然气地球科学*, 2005, 16(4): 477-484.]
- [36] Lin Chunming, Zhuo Hongchun, Li Guangyue, *et al.* Estimates of shallow biogas resources in Hangzhou Bay area and its geological implications[J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(6): 823-830. [林春明, 卓弘春, 李广月, 等. 杭州湾地区浅层生物气资源量计算及其地质意义[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(6): 823-830.]
- [37] Whiticar M J. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane[J]. *Chemical Geology*, 1999, 161(1/3): 291-314.
- [38] Liang Linheng, Zhou Youwu, Wang Jiacheng, *et al.* Changes of permafrost environment in Great Xian ridges after disastrous forest fire: Takeing Gulian Mining area as an example[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1991, 13(1): 17-25. [梁林恒, 周幼吾, 王家澄, 等. 大兴安岭林区火灾后冻土环境的变化——以古莲河煤矿地区为例[J]. *冰川冻土*, 1991, 13(1): 17-25.]

Formation Conditions and Existing Evidences of Biogenic Gas in the Mohe Basin, China

MIAO Zhong-ying¹, WANG Jing², PAN Chun-fu³, HE Da-xiang⁴, ZHAO Xing-qi⁴

(1. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

2. *Luliang Oilfield Operation District, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, China;*

3. *Langfang Branch of PetroChina Exploration and Development Research Institute, Langfang 065007, China;*

4. *State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting in China University of Petroleum, Beijing 102240, China)*

Abstract: Biogenic methane is an important resource which exists in conventional microbial gas reservoir, and unconventional microbial gas, such as hydrate, shale gas, coalbed methane, and so on. By the analysis of the living environment of microbes, such as temperature, salinity, pH, living space, nutrient substrates, and so on, and combined with the evidence for active microbe, it's thought that: (1) The appropriate formation water salinity, moderate pH, abundant nutrition are beneficial for the microbial life activities. (2) The phenomenon of GC presenting bulge phenomenon, the detected 25-norhopane, ethene and propene, the $\delta^{13}\text{C}_1 < -60\%$, and the emergence of biogenic gas in the adjacent areas, and so on, is the evidences of the existence of biogenic gas in the area. (3) Influenced by the seasonal variation, the primary biogenic gases of acetate fermentation are formed periodically; the reduced secondary biogenic gases of carbon dioxide are formed in the micro-fractures member of Upper Jurassic. In the Mohe Basin, biogenic gas is not only the important natural gas resource style, but also one of the potential gas sources of hydrate.

Key words: Biogenic gas; Living environment; Nutrient substrates; Geochemistry; Hydrocarbon generation model; Mohe Basin