

中国新生代生物天然气藏的基本形成模式

周荔青^{1,2}, 刘池阳¹

(1. 西北大学地质系, 陕西 西安 710069; 2. 中国石化 华东分公司, 江苏 南京 210011)

摘要: 受新生代大地构造演化分区及古地理、古气候分区控制, 我国新生代盆地发育 5 种生物气藏的基本形成模式。第一类是西北部山间大型走滑挤压拗陷盆地的高原、高纬度、高海拔、寒冷、干旱气候下的内陆咸化湖、盐湖生物天然气藏; 第二类为西南部山间超小型走滑拉分裂陷盆地的热带亚热带、潮湿气候下的内陆微咸水、淡水湖成因的生物天然气藏; 第三类为东南沿海亚热带区平原、河口湾相、大型三角洲相的第四系生物天然气藏; 第四类为东部走滑拉张裂陷盆地的混合成因生物天然气藏; 第五类为南海准被动大陆边缘上第三系—第四系亚热带、热带贫营养滨浅海生物成因天然气藏。

关键词: 生物气藏; 形成模式; 新生代; 中国

中图分类号: TE122. 3

文献标识码: A

生物气的成藏受有机母质类型、有机质在浅表的保存条件、甲烷菌生存及繁殖的地质条件、气藏的聚集保存条件等综合控制^[1~4], 因此盆地构造演化及古气候、古生态条件等对生物气藏的形成具有重要控制作用。在印度板块与欧亚板块陆—陆碰撞造山作用及太平洋板块的俯冲消减作用下, 形成了中国东、西部的构造分区, 西部的强烈造山隆起对我国新生代的气候分区产生了深远的影响。受新生代区域构造应力场及古气候、古海平面升降、古生物群组的控制, 我国不同地区的含油气盆地具有不同的构造、沉积演化特征, 具有不同的生物天然气形成条件, 从而形成了 5 类生物天然气的基本成藏模式。

1 西北部山间大型走滑挤压拗陷盆地生物成因天然气藏

以柴达木盆地第四系生物成因天然气藏为典型实例^[1,5], 发育西北部山间大型走滑挤压拗陷盆地的高原、高纬度干冷气候下的内陆咸化湖、盐湖生物天然气藏, 发育低丰度草本腐植型母质, 在近源的大型继承型背斜形成大中型天然气田。

1.1 快速沉降有利于生物气成藏

在走滑挤压构造作用下, 柴达木盆地东部第四纪沉积速度达 800~ 1 000 m/Ma。快速沉降既有利于有机质保存, 又有利于形成半深水—深水咸化湖,

从而形成良好的盖层, 大大降低甲烷扩散速度; 同时也使从上覆水体中补给溶解硫酸盐的速度下降, 为微生物群落的生存和繁殖创造了有利的环境。此外, 快速沉降使该区第四系源岩的成岩、固结、压实程度较低, 孔隙直径达 1~ 5 μm , 不会阻碍个体大小约为 1~ 10 μm 的细菌的活动。

1.2 高原、高纬度寒冷地区有利于生物气藏的形成

该区第四纪处于高原、高纬度寒冷地区, 海拔 2 000~ 3 000 m, 现今年平均气温只有 3.7 $^{\circ}\text{C}$, 且一年中有 10 个月冰冻期, 发育指示寒冷水体的喜冷种属无刺土星介、湖陆花介, 未见热带种属, 未见指示温热环境的紫红色沉积, 植被以草本为主, 含量一般在 60% 以上, 木本植物含量一般在 3% 以下, 草原指数一般在 90% 以上, 可推知第四纪气温较低。

寒冷气候条件不仅使该区草本植物发育, 为甲烷菌提供了更多的营养, 而且也使甲烷菌在浅表条件的活动受到抑制, 使有机质不被过早地消耗, 以便进入深埋后, 抑制作用解除, 形成的生物气更有利于聚集成藏。同时, 寒冷气候使甲烷活动能力减弱而使散逸量相对减小。

1.3 半腐殖型和草本腐植型低有机质丰度母岩

该区内源岩沉积于半深湖、浅湖和沼泽环境。由于气候寒冷干旱, 总体生物丰度偏低, 沉积物中有机碳含量平均仅 0.3%, 氯仿沥青“A”含量平均为 0.11%, 总烃含量平均为 292×10^{-6} 。该区有机质

主要是陆源为主的腐殖型和含腐泥腐殖型,干酪根镜检和扫描中见到大量镜质体和角质体,干酪根元素分析 H/C 值为 0.49~ 3.91,干酪根碳同位素值为 $-19.52\text{‰} \sim -27.3\text{‰}$ 。氯仿抽提物中以非烃为主(占 40%~ 70%),饱和烃含量低($< 20\%$),说明有机质主要源于草本植物^[1,5]。

虽然源岩有机质丰度不高,但其厚度大,且早生草本腐殖型母质占据主导。实验表明,甲烷菌的营养来源主要是纤维素、半纤维素、糖、淀粉、果胶等碳水化合物,这些物质在草本植物中含量最丰富,这就决定了生物气的母质主要是半腐殖型和草本腐殖型有机质。据模拟实验分析,属盐湖环境的柴达木第四系产甲烷潜力最大,平均为 $377.72 \text{ m}^3/\text{t}^{[4]}$ 。

1.4 适中的地温有利于甲烷菌大量繁殖

生物气的生成下限温度为 $80\sim 85\text{ }^\circ\text{C}$,主产气带为 $25\sim 65\text{ }^\circ\text{C}$,这与甲烷菌的生存温度及最适温度基本一致。由于源岩埋深一般小于 $2\ 100 \text{ m}$,埋藏时间短,不超过 3.05 Ma ,再加上地温梯度低于 $3.6 \times 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}/\text{m}$,目前尚处于未成熟阶段,所有样品 R_o 值均小于 0.5% 。但这一点对于生物气来说,恰是其生气带。在生物模拟实验中,从深到浅的样品中都程度不同地见到了与生化甲烷过程有关的三大类菌群。

1.5 高盐度咸化湖的浅层抑制作用有利于深部生物气形成聚集

该区第四纪以干旱气候条件为主,水体含盐度较高,盐度最大值为 5.40% ,最小值为 0.03% ,平均为 1.95% 。盆地内代表干旱盐碱条件的麻芒粉、藜粉、蒿粉、白刺粉在第四系中从浅到深普遍存在,在第四系中普遍存在指示咸水一半咸水条件的近岸正星介,第四系含较多菱形石膏晶体,局部富集成石膏层,充分说明第四系沉积时水体中含有较高浓度的硫酸盐。高浓度硫酸盐沉积水体抑制了浅表条件下生物甲烷菌的活动,起到了保护生气层的作用。受硫酸盐消耗浓度及甲烷菌生存的适合温度 $30\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$ 控制,该区一直到埋深 $1\ 500\sim 2\ 000 \text{ m}$ 时才形成生物气高峰,有利于有机质的充分利用及气藏保存。

1.6 储盖层及其封盖机理

该区储层以细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩为主。由于埋深浅、时代新、压实程度低、成岩性差,使之以原生粒间孔隙为主,具有较高的孔隙度和渗透性。岩心孔隙度一般均在 20% 以上,平均达 31% ;渗透率由 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 到大于 $1\ 000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

该区主要发育半深湖相泥岩及膏盐类盖层。由于埋藏小于 $2\ 100 \text{ m}$,时代新、压实程度差、成岩作用弱,盖层孔隙度平均为 30% ,有一定渗透性

($0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)。其主要封盖机理是盖层饱和高矿化度地层水后,突破压力较干样上升了 $58\sim 330$ 倍,扩散系数较干样下降 $2\sim 3$ 个数量级^[4];其次,较厚的区域盖层、泥岩盖层中流体压力与气藏压力接近、多套盖层、盖层中含高浓度气态烃及寒冷天气均使天然气扩散作用下降^[6]。

1.7 发育近源继承性大型挤压成因背斜构造

柴达本盆地东部的三湖第四纪沉积拗陷,沉积和构造格局大体上分为北斜坡区、中央凹陷区和南斜坡区。共发现背斜构造 12 个,均具有由浅至深地层倾向变大、闭合度增大、地层厚度由构造轴部向翼部增厚等特点,为长期发育的背斜。局部构造被浅层断层不同程度复杂化,浅层断裂大多为横切构造长轴的张性小断层,长度在数千米以内,断距多小于十多米。

1.8 生物气富集规律

受生物气源岩的平面分布控制,生物气主要富集在靠近盆地沉降、沉积中心生气强度最大的盆地中心区^[3]。据研究,该区第四系气源岩面积约 $15\ 000 \text{ km}^2$,其中最好的气源岩分布面积约 $4\ 500 \text{ km}^2$ 。大中型生物气田主要分布在三湖拗陷中央凹陷与北部斜坡区的埋深较大、盖层完整性好、断裂密度低的继承性大型背斜构造带;在远离主要拗陷区部位,生气强度下降,盖层薄,盖层断层发育,气藏少,且规模明显变小。

2 西南部山间走滑拉分裂陷盆地生物天然气藏

在西南部的滇黔桂地区,在印度板块对欧亚板块西部陆陆碰撞的区域构造背景下,该区新生代沿大型走滑断裂广泛发育狭长型小型山间走滑拉分裂陷盆地,如百色、保山、陆良、曲靖、昆明等盆地,面积为 $200\sim 1\ 000 \text{ km}^2$,长宽比为 $1:4\sim 1:10$,主要接受上第三系沉积,其次是下第三系,最大厚度达 $2\ 000\sim 3\ 000 \text{ m}$ 。受该区新生代盆地演化及烃源岩沉积时环境的氧化还原程度、有机质丰度、硫酸盐和硝酸盐的含量、温度、pH 值和孔隙空间等因素的综合控制,该区具有良好的生物气成藏条件,从而在这些盆地普遍发育小型浅层生物成因气藏。

2.1 普遍经历过短暂快速的走滑拉分构造作用

一般认为,生物气常发现于沉积速率大于 $50 \text{ m}/\text{Ma}$ 的地区。快速沉降除形成湖相烃源岩外,还有利于有机质的快速埋藏保存,有利于形成还原环境促使甲烷菌大规模繁殖,有利于形成富含水的细粒沉积

物从而抑制浅层气的扩散。该区第三纪拉分裂陷盆地普遍都经历过阶段性快速走滑拉分沉降作用。百色盆地快速走滑拉分期为下第三纪,下第三系那读组沉积速率为 175 m/Ma,百岗组为 77 m/Ma,湖相、湖沼相暗色泥岩厚度达 300~1 000 m^[7];保山盆地则在上第三纪快速拉分沉降,羊邑组沉积速率为 300~800 m/Ma,暗色泥岩厚度达 300~800 m^[8]。

2.2 普遍发育未成熟高有机质丰度的湖相、湖沼相 ㊟型、㊟型母质

该区第三纪处于高纬度热带、亚热带地区,气候温热潮湿,湖盆中水生草本植物及浮游生物特别繁盛,使该区烃源岩普遍具有中一较高丰度母质,是形成生物气的物质基础。

百色盆地发育高有机质丰度母岩。那读组泥岩有机碳含量为 1.19%~1.79%,氯仿沥青“A”含量为 0.056%~0.096%,烃含量为 183×10^{-6} ~ 510×10^{-6} ;百岗组泥岩有机碳含量为 0.68%~1.43%,氯仿沥青“A”含量为 0.02%~0.06%,烃含量为 132×10^{-6} ~ 180×10^{-6} 。那读组以腐殖-腐泥型为主,百岗组为腐泥-腐殖型、腐殖型,有机质来源为浅湖相、湖沼相淡水浮游生物及水生草本植物、高等植物。

保山盆地保参 1 井上第三系羊邑组灰色泥岩-浅灰色泥岩累积厚度 458.5 m,有机碳含量平均为 1.05%;南林组泥岩总厚 300.5 m,有机碳含量平均为 1.08%。有机质中属于可溶的烃类部分所占比例小、烃转化率低,热演化程度不高。上第三系南林组有机质以腐殖型为主,而羊邑组有机质以腐泥腐殖型为主。上第三系正烷烃主峰碳数多为 C₂₉ 或 C₃₁,甾烷碳数组成 C₂₇/C₂₉ 介于 0.31~0.50 之间。在甾烷组成三角图中,所测样品多处于偏腐殖的混合型区间^[7]。

在百色盆地下第三系及保山盆地上第三系泥岩、褐煤中,富含主要来源于水生草本植物的有机氮、粗纤维、半纤维,其含量占有有机质的 30%~40%,有利于生物气的形成^[7,8]。

2.3 主力烃源岩分布在适中深度范围

大量实验表明,甲烷菌生存的温度为 0~70 °C,最适宜的范围为 36~42 °C。滇黔桂地区走滑拉分裂陷盆地地温场特点是拉张时间短,深部热流供给少,且由于规模小,盆地热冷却速度较快。百色盆地早第三纪主要拉张期平均古地温梯度约为 3.4×10^{-2} °C/m,随着盆地迅速热衰减,现今平均地温梯度为 2.55×10^{-2} °C/m。由此,在盆地埋深 2 000 m 以上范围,均为未成熟烃源岩。由于百色盆地现今地温较低,目前生物甲烷菌最活跃的范围主要在埋

深 800~1 500 m,恰是主力烃源岩那读组、百岗组的分布深度。

保山盆地保参 1 井井深 1 305 m 的地温为 74 °C,井深 540.0 m 的现今温度为 41.5 °C,模拟实验也得出保参 1 井 400~800 m 为生气速率最大的井段。在这一深度发育最利于生物气产生的层位,即有机质丰度最高的主力烃源岩——羊邑组四段。因此,保山盆地主力烃源岩与甲烷菌最适宜的层位一致,是保山盆地有生物气藏形成的最根本原因。

细菌的活动需要一定的孔隙空间,适中埋深有利于细菌的活动。保山盆地上第三系羊邑组埋深 400~800 m,孔隙空间为 20~100 μm,百色盆地那读组、百岗组烃源岩埋深为 800~1 500 m,孔隙空间为 10~20 μm,远大于甲烷菌的个体,有利于甲烷菌的大规模活动。

2.4 微咸化、弱还原和近中性的水介质条件有利于生物气形成

与快速沉降及高原地区的气候条件有关,该区湖泊都有一定程度的咸化,如保山盆地上第三系,属于淡水沉积但盐度达到 15.7‰接近微咸水^[7],由此在浅埋藏阶段沉积物中富含的硫酸盐、硝酸盐抑制了甲烷菌的活动,有利于草本母质的保存。保山盆地保参 1 井埋深 400 m 的上第三系泥岩未检出硝酸盐类,硫酸盐含量低,仅 180~240 μg/g,并且 Pr/Ph 大于 1,呈姥鲛烷优势,表现为弱还原环境,检出一定丰度的甲烷菌及其它厌氧菌,表明早期的抑制作用在埋深 0~400 m 范围,随着硝酸盐和硫酸盐消耗完毕,甲烷菌开始大规模活动。

2.5 良好的生物气保存条件

该区各主要含气盆地的主力储层上方一般都发育 30~300 m 泥质岩,既是盖层也是源岩,由于源岩富含烃类,阻止了生物气的扩散。多套生储盖组合也有利于阻止生物气逸散。后期构造稳定,盖层断裂一般不切过区域性盖层,亦有利于该区生物气藏的保存。

2.6 生物气富集带分布规律

气藏的平面分布受沉积相带及构造区带双重控制,有利的沉积相带是主力生气层的深湖相与各类碎屑岩沉积体的过渡相区,有利的构造区带是边缘走滑断裂带的低台阶到深洼、斜坡内带^[9]。在两类区带的叠合区,具有形成生物气藏的有利条件:一是主力烃源岩厚度大,埋深适中,正处于甲烷菌活动高峰期,产气强度大;二是上覆盖层厚度大,封盖条件好;三是断层密度远低于边界断裂带与斜坡外带,有利于气藏保存;四是砂泥比适中,岩性及岩性-构造圈闭发育;五

是储层与盆地边缘大气水渗滤带隔绝,形成了无氧、不含 SO_4^{2-} 的有利于甲烷菌活动的环境。

3 东南沿海第四系生物成因天然气藏

以长江入海口、钱塘江口、椒江口、浙江及邻区沿海平原区生物成因天然气藏为典型实例,发育大量的小型浅埋藏(30~70 m)生物气藏。对气源岩的沉积环境、地球化学特征及成气机理的研究表明,该区浅层生物气藏的形成与气源岩的沉积背景、地球化学环境、有机质丰度及类型、 SO_4^{2-} 离子浓度和古地理环境等因素密切相关^[1,10,11]。

3.1 持续沉降、快速沉积作用是生物气形成的重要地质条件

沿海平原河口湾相为高沉积速度分布区,第四纪以来持续较快速沉积,沉积速率达 4~5 mm/a,使得沉积有机质能较快地进入还原环境,避免了有机质的氧化破坏,使其得以及时埋藏保存,同时也减弱了从上覆水体中不断补给溶解硫酸盐,从而为微生物群落的生存和繁殖创造了有利的环境和物质条件。快速沉积的前三角洲相厚层细粒沉积建造有利于抑制生物成因气的扩散,快速沉积区特别高的甲烷生成速率则造成了天然气藏的动态聚集^[1]。

3.2 丰富的有机质是生物气形成的基本物质基础

东南沿海地区第四系处于中纬度亚热带平原地区,气候潮湿,气温适中,水体中广泛发育水生淡水浮游生物,在三角洲平原发育沼泽相草本植物。在此条件下,该区主力气源岩有机质丰度多在 0.4% 以上,最高可达 0.7%~1.3%,是浅层生物气得以广泛形成的重要物质基础。

对椒江地区全新世气源岩的有机质类型研究结果表明,该区有机质类型属含草本腐泥腐殖型—含草本腐殖型,其特点是以富含木质素的木本植物为主要生源,却缺乏富含纤维素、半纤维素、糖、淀粉等细菌可降解物的草本植物,椒浅参 1 井第四系源岩的抽提物饱和烃中,来自脂肪或其它类脂类等细菌易降解物的饱和烃只占 35.5%,只有柴达木盆地第四系母岩的 1/2,而来自难以为细菌所利用的生物蜡生源的饱和烃却几乎是柴达木盆地生物气源岩的 3 倍。因此,就生气母质组成而言,浙江的气源岩母质类型不如柴达木盆地的气源岩,但较高的有机质丰度弥补了草本母质较缺乏的不足^[1]。

3.3 弱还原和近中性的水介质条件有利于生物气的形成

甲烷菌是专性厌氧菌,在自然界中,需待所有的

氧、硝酸盐和大部分硫酸盐还原掉之后甲烷菌才能繁殖。其次,中性介质有利于生物气的生成,有利于甲烷菌生长的 pH 值范围为 5.9~8.8,最佳范围为 6.8~7.8。研究表明,该区气源岩均处于还原—强还原环境,其水介质的 pH 值为 6.6~8,有利于甲烷菌的生长和繁殖,有利于生物气的形成^[11]。

3.4 较高浓度的溶解硫酸盐有利于生物气在地下较深处的形成、富集和保存

该区第四系气源岩主要是海相、海陆交互环境的产物,其孔隙水中较高浓度的硫酸盐对避免有机质在浅表处过多地消耗起着极为重要的作用。椒浅参 1 井淤泥质粘土氯仿抽提物芳烃组分的质谱分析中普遍检测到的有机硫化物,如苯并噻吩、苯并萘噻吩等,显然都与曾存在的硫酸盐有关^[11]。

3.5 气候因素间接地影响和控制了浅层气的生成与富集

该区在全新世早、中、晚期,气候主要经历了温暖湿润—温热湿润—温暖湿润的演化过程,显然有利于产甲烷菌的生命活动。研究表明,温度对甲烷的生成有着显著的影响,如甲烷的生成速度在门多塔湖五月份(16℃)样品中比一月份(4℃)样品中高 100~400 倍,在库兹尼奇哈湖和切纽伊基切湖沉积物中夏季比冬季高 1~2 个数量级^[1]。

但是,湿热的气候又使得最有利于微生物利用的草本植物在搬运过程中易于分解、损失,减少了沉积物中甲烷菌所需的碳水化合物养料,这显然对生物气的大量形成不利。该区气源岩孢粉分析所反映出的以木本植物孢粉占优势的现象显然与气候有密切的关系。

3.6 广泛发育岩性圈闭是生物气成藏的重要条件

该区生物气藏主要形成于第四纪末次冰期以来河流下切形成的深切河谷和海湾滨岸地带,特别是海陆性强的河口湾和受海侵影响的河漫滩地带。储层主要为前三角洲相泥岩中的贝壳层、粉砂层等,孔渗好,孔隙度可达 40% 以上,其横向快速尖灭形成岩性圈闭。

4 东部走滑拉张裂陷盆地零散型混合成因生物天然气藏

在东部走滑拉张裂陷盆地,发育零散型混合成因生物天然气藏,典型区如渤海湾盆地、苏北盆地、南襄盆地、江汉盆地等^[1,12]。该区发育深湖—半深湖相高有机质丰度母岩,由于草本母质贫乏,并在浅地表区被大量损耗,加之后期拉张改造强烈,仅部分区带发

育小型、中小型生物天然气藏、菌解型生物成因气藏^[13], 以及生物成因与热裂解成因混合天然气藏。

4.1 形成生物天然气藏的有利与不利条件

在强烈拉张走滑裂陷作用下, 中国东部的渤海湾、苏北、南襄、江汉盆地具有形成混合成因生物天然气藏的有利条件: 1) 有机质丰度高达 1%~5%, 氯仿沥青“ A ”含量达 0.1%~0.2%, 总烃含量达 $200 \times 10^{-6} \sim 2\,000 \times 10^{-6}$, 构成生物气形成的雄厚物质基础; 2) 发育深水—半深水、半咸化—咸化湖泊, 较高浓度的溶解硫酸盐对甲烷菌的浅层抑制作用以及沉降速度高达 200~400 m/Ma 均有利于有机质的保存; 3) 波动式演化形成多套生储盖组合, 有利于生物气藏的保存; 4) 发育大量同沉积构造及构造—岩性复合圈闭, 有利于长期捕获生物成因天然气。

但此类盆地又存在生物气成藏的不利因素。首先, 有利于微生物利用的草本植物缺乏。该区处于中纬度近海平原亚热带—暖温带地区, 气候湿润, 快速沉降形成深水—半深水湖泊, 半咸水、淡水水生浮游生物占据绝对优势; 母岩有机质丰度高, 且以 iv 型、㊸型干酪根占据绝对优势; 在盆地边缘广泛发育高等植物, 但因湿热气候条件, 木本植物比草本植物更为发育; 由于气候温暖湿润, 在浅埋地带生物化学作用使大部分草本植物被分解破坏。

其次, 由于地温梯度高, 烃源岩形成早, 以下第三系烃源岩为主, 后期多叠加有较厚的无暗色泥岩的上第三系—第四系冲积平原粗碎屑建造。下第三系源岩的成岩、固结、压实程度较高, 大多埋深达 2 500~5 000 m, 页岩的孔隙大小也仅 1~2 μm , 很明显地阻碍甲烷菌的活动和繁殖。以生物气形成的下限温度 80~85 $^{\circ}\text{C}$ 计算, 这些盆地生物气源岩主要深度限定在 2 000~2 200 m 以浅范围内, 因而主力烃源岩要么处于埋深较大地温太高处, 要么分布于坳陷边缘地区, 不利于生物气的保存。

此外, 由于断陷内断裂密度大, 对浅埋区封盖层的破坏造成生物气大量逸散。部分盆地主力烃源岩沉积后, 遭受挤压隆升剥蚀, 使浅埋藏有机质遭到消耗破坏, 不利于生物气的形成, 如苏北盆地的主力烃源岩阜宁组沉积后, 吴堡运动使之强烈抬升剥蚀。

4.2 生物气藏的分布规律

在东部走滑拉张裂陷盆地, 以下 4 类区带生物气藏最为发育。

1) 生物气藏常发育于凹陷边缘区带, 主要是高断阶与外斜坡带。此处烃源岩埋藏浅, 埋深 1 000~1 500 m, 且长时期处于滨浅湖沉积环境, 从而使草

本植物比例高于其它区带, 以腐殖型母质为主, 地温适中, 烃源岩孔隙度较大, 有利于甲烷菌的活动, 如冀中坳陷廊固凹陷外斜坡的柳泉构造沙三段生物气藏。其次, 此类区带油气藏埋藏浅, 地下水活跃, 常发生厌氧菌对已有油气藏的改造, 形成菌解成因生物气田, 如苏北盆地金湖凹陷三河次凹外斜坡刘庄油气田的阜二段生物气藏, 同一区带的范庄油田中亦混有生物成因天然气^[1]。

2) 在湖盆萎缩期暗色泥岩较发育的区带生物气藏较发育, 如渤海湾盆地地下第三系上部的东营组、沙一段及上第三系明化镇组暗色泥岩较发育的区带。此类泥岩以腐殖型、腐殖腐泥型母质为主, 沉积建造中草本植物的比例明显高于下第三系的中下段; 埋深较适中, 约为 1 500~2 000 m, 且湖盆萎缩期形成的暗色泥岩经历的古地温梯度较低, 成岩、固结、压实程度较低, 孔隙达 1~10 μm , 有利于甲烷菌的活动。如辽东凹陷欧利坨子构造的辽 12 井在井深 1 579~1 669 m 的沙一段中获高产生物气流, 欧 8 井在沙一段中、黄骅坳陷南水 4 井在上第三系明化镇组、黄骅坳陷东凹陷沧 1 井在 1 810~1 821 m 的沙一段中获高产生物气流, 江汉盆地潜江凹陷潜北断裂带的潭 32 井上第三系广华寺组及潭 34 井潜江组四段发育生物气层^[1]。

3) 在中国东部大型走滑拉张裂陷盆地中, 早期型凹陷生物气藏较发育。由于早期型断陷早第三纪快速沉降, 发育巨厚湖相建造, 而新第三系、第四系厚度较薄, 使得下第三系烃源岩能够普遍处于适中埋藏深度, 从而具有良好的生物气成藏条件, 如苏北盆地的金湖凹陷和渤海湾盆地冀中坳陷的廊固凹陷。在这些凹陷的部分区带, 生物成因气藏较为普遍。

4) 外斜坡带的生物灰岩相区是生物天然气藏、菌解型生物天然气藏较发育的区带, 且生物气层常发育在生物灰岩储层中。典型实例为苏北盆地金湖凹陷三河深凹北斜坡的刘庄、范庄菌解成因生物天然气(藏), 黄骅坳陷南皮凹陷沧州市构造也发育生物灰岩生物天然气藏。这是由于生物灰岩相区发育 CaCl₂ 水型地层水, SO₄²⁻ 含量低, 有利于甲烷菌及厌氧菌的活动; 而陆相含油气盆地中常发育 Na₂SO₄ 水型, 往往不利于厌氧菌及甲烷菌的繁殖及活动。

5 南海复合型大陆边缘张性断陷盆地上第三系—第四系生物成因天然气藏

典型区如南海地区的莺歌海、琼东南盆地的上

第三系—第四系生物成因气藏。莺歌海盆地是一个呈北西走向、发育于红河大型走滑断裂带周缘的早第三纪走滑拉张盆地,琼东南盆地是一个早第三纪陆缘拉张盆地,进入晚第三纪后,随着南海的离裂,该区演化为准被动大陆边缘,莺—琼盆地统一快速拗陷下沉,整体接受了巨厚的上第三系和第四系沉积。

5.1 快速沉降形成有利于生物甲烷菌活动的环境

上中新世—第四纪,受喜山运动影响,盆地拗陷明显加剧,水体加深。特别是进入第四纪,拗陷运动达到高峰,沉积速率加快,沉降与沉积欠补偿。上新统平均沉积速率为 540 m/Ma ,第四系高达 $800 \sim 850 \text{ m/Ma}$ 。第四系—上中新统厚 $2\,000 \sim 3\,000 \text{ m}$,且泥岩比例高,厚度稳定^[1]。

由于快速沉积,形成了一个水体较深、水中游离氧贫乏的还原环境,使得有机质快速堆积并得到迅速埋藏和保存,同时也削减了从上覆水体不断补偿的硫酸盐,从而为微生物群落的生长和繁殖创造了有利的环境条件,形成广泛发育的岩性及岩性—构造复合型圈闭。

该区地温梯度为 $3.6 \times 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C/m}$,生物气下限温度为 $80 \sim 85 \text{ }^\circ\text{C}$,主生气带在 $25 \sim 65 \text{ }^\circ\text{C}$,其埋深约为 $400 \sim 1\,200 \text{ m}$,下限深度为 $2\,000 \text{ m}$ 。样品中的细菌实验分析证明,该区 $2\,000 \text{ m}$ 以上沉积物样品含丰富的与厌氧发酵产甲烷直接相关的菌群,主要有厌氧纤维素分解菌、发酵性细菌和产甲烷菌三大类。其中,发酵性细菌最普遍,含量达 $2.5 \times 10^2 \sim 3.5 \times 10^4 \text{ 个/g}$;纤维分解菌含量为 $2.5 \times 10^8 \sim 7.0 \times 10^8 \text{ 个/g}$;甲烷菌也相当富集。在 $2\,300 \text{ m}$ 以下,菌群浓度迅速下降^[1]。

5.2 半咸水海相沉积环境沉积物具有较高的生物气生成潜力

莺—琼盆地上中新统一第四系处于大陆边缘海热带、亚热带地区,在快速沉降的欠补偿环境下,该区以贫营养水体为主,使细粒沉积物中有机质丰度较低。有机碳含量为 $0.2\% \sim 0.5\%$,平均为 0.32% ;氯仿沥青“*A*”含量极低^[1]。有机质主要为腐泥腐殖型及腐殖型,有相当一部分利于产生物气的草本腐殖型母质。细菌实验证明,其产甲烷率平均为 $277.8 \text{ m}^3/\text{t}$,远高于属淡水沉积环境的胜利油田、华北油田、昆明盆地及辽河拗陷样品^[1]。

5.3 半咸水海相沉积环境抑制有机质的损耗

在现代莺—琼盆地的海底沉积物中普遍缺乏生物甲烷菌,表明高浓度硫酸盐沉积水体抑制了浅表条件下生物甲烷菌的活动,起到了保护生气层的作

用。受硫酸盐消耗浓度及甲烷菌生存的适合温度 $30 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$ 控制,该区一直到埋深 400 m 时才形成生物气高峰,有利于有机质的充分利用及气藏的保存。

5.4 具有良好的生物气封盖条件

该区具有良好的浅层生物气封存条件,主要原因一是单层泥岩厚度较大,横向上分布稳定,单层厚度一般达 $20 \sim 250 \text{ m}$;二是由于泥岩生成大量生物气,从而形成浓度封闭,有效地阻碍了下伏储层天然气向上迁移和扩散;三是深水柱地静压力对气藏扩散的抑制作用;四是深水盆地海底沉积物的地温较低;五是准被动大陆边缘盆地的区域性泥岩封盖层具有良好的稳定性,后期又无断裂切错,使该区生物气顺断裂大规模渗滤、散失作用较弱。

5.5 发育大量岩性型圈闭

在上中新世—第四纪巨厚的细粒沉积建造中,砂岩占地层比例约为 $10\% \sim 20\%$,广泛发育三角洲席状砂体、透镜状砂体、上倾尖灭砂体等岩性圈闭,从而形成大量岩性型生物气藏。

6 主要结论

受新生代大地构造演化分区及古地理、古气候分区的控制,我国新生代盆地发育 5 种生物气藏的基本形成模式。第一类是西北部山间大型走滑挤压拗陷盆地的高原、高纬度干冷气候下的内陆咸化湖、盐湖生物天然气藏;第二类为西南部山间超小型走滑拉分裂陷盆地的热带、亚热带湿热气候下的内陆微咸水、淡水湖生物气藏;第三类为东南沿海亚热带区平原、河口湾相、大型三角洲相区的第四系生物天然气藏;第四类为东部走滑拉张裂陷盆地零散型混合成因天然气藏;第五类为南海准被动大陆边缘亚热带、热带贫营养浅海沉积环境的上第三系—第四系生物成因气藏。

参考文献:

- 戚厚发,关德师,钱贻伯等. 中国生物气成藏条件[M]. 北京:石油工业出版社,1997
- 关德师. 控制生物气富集成藏的基本地质因素[J]. 天然气工业,1997,17(5): 8~12
- 陈英,戴金星,戚厚发. 关于生物气研究中几个理论及方法问题的研究[J]. 石油实验地质,1994,16(3): 209~212
- 陆伟文,海秀珍. 生物气模拟生成实验及地层中生物气生成量之估算[J]. 石油实验地质,1991,13(1): 65~70
- 周翥虹,周瑞年. 柴达木盆地东部第四系气源岩地化特征与生物气前景[J]. 石油勘探与开发,1994,21(2): 30~36
- 李明宅,张洪年,郝建军. 生物气的生成演化模式和初次运移特征[J]. 石油实验地质,1995,17(2): 147~150

- 7 戴家庆. 广西百色盆地浅层气藏简介[J]. 石油天然气地质, 1990, 11(3): 343~ 346
- 8 刘树根, 戴苏兰, 赵永胜等. 云南保山盆地烃源岩及其天然气生成特征[J]. 天然气工业, 1998, 18(1): 18~ 24
- 9 罗槐章. 陆良盆地上第三系未熟烃源岩特征及生物气成因分析[J]. 天然气工业, 1999, 19(5): 21~ 26
- 10 李汶国. 物质平衡法计算生物气率及其地质应用[J]. 石油实验地质, 1988, 10(1): 1~ 4
- 11 张文昭, 张湘宁. 浙江省油气地质与第四系浅层天然气勘探与开发[J]. 天然气工业, 1993, 13(3): 1~ 5
- 12 李学田, 戴贤忠, 张文达等. 孤岛浅层气藏的盖层评价与成因机制[J]. 石油实验地质, 1990, 12(3): 307~ 312
- 13 李赞豪. 具有广阔勘探前景的一种新型浅层气——油层、煤层灰氧菌解再生生物气[J]. 石油实验地质, 1994, 16(3): 220~ 224

BASIC FORMING MODELS OF THE CENOZOIC BIOGAS POOLS IN CHINA

Zhou Liqing^{1,2}, Liu Chiyang¹

(1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China;

2. East China Subsidiary Company, SINOPEC, Nanjing, Jiangsu 210011, China)

Abstract: Under the control of geotectonic evolution zonality and paleogeographic and paleoclimatic zonality of the Cenozoic, five kinds of basic forming models of biogas pools were developed in the Cenozoic basins of China. The first pools are in salt lakes and inland salt lakes in the circumstances of highlands, high latitude, high elevation and cold and dry climate, which are located in large intermontane strike-slip compressional down-warped basins in the northwestern part of China. The second are in inland brackish water and fresh water lakes under humid tropic and subtropical zone climate, which are located in ultra small intermontane strike-slip extensional rift basins in the southwestern part of China. The third are the Quaternary biogas pools in plain, estuarine facies and large delta facies areas in the southeast coastal subtropical zones of China. The fourth are mixed-genetic biogas pools in the eastern strike-slip extensional rift basins of China. The fifth are the Upper Tertiary-Quaternary biogas pools in the poor-trophic shallow littoral areas of tropic and subtropical zones, which are on the quasi-passive continental margins of the South China Sea.

Key words: biogas pool; forming model; Cenozoic; China