

原油降解气的形成条件及其特征^{*}

王政军^{1,2,3} 朱光有² 王政国⁴ 金强³ 张水昌²

(1. 中国石油冀东油田公司勘探开发研究院 2. 中国石油勘探开发研究院 3. 中国石油大学·华东
4. 中国石油华北油田公司采油三厂)

王政军等. 原油降解气的形成条件及其特征. 天然气工业, 2008, 28(11): 29-33.

摘要 原油降解气是指原油在厌氧微生物作用过程中形成的一种次生型生物气。作为非常规气藏之一, 原油降解气近年来受到了极大的关注, 而相关研究在我国才刚刚起步。因此, 研究其生气机制及其地化特征, 建立原油降解气的地球化学判识指标, 并指出勘探前景, 对缓解当前能源危机和原油降解气的勘探都具有重要意义。研究结果发现: 原油降解气主要通过二氧化碳还原生成甲烷; 中—低矿化度的 NaHCO_3 型或 CaCl_2 型地层水有利于微生物的繁殖及其对原油的降解进而生成甲烷。原油降解气形成的油层温度低于 $80\text{ }^\circ\text{C}$, 埋深一般小于 $2\ 500\text{ m}$; 对应原油的成熟度为低—中等成熟。原油降解气具有碳同位素轻、天然气组分干、氮气含量较高, 同时含少量二氧化碳和氢气, 并具有储层时代新、能大规模聚集藏的特点。结论认为, 我国具有较大的原油降解气勘探潜力。

主题词 稠油 厌氧降解 气藏形成 机理 生物气 勘探评价

我国的稠油是指地层原油黏度大于 $50\text{ mPa}\cdot\text{s}$ (地层温度下脱气原油黏度大于 $100\text{ mPa}\cdot\text{s}$), 原油相对密度大于 0.92 的原油^[1]。稠油主要是生物降解形成的^[2]。生物在降解原油的过程中, 消耗了原油中的低碳数烃类, 使原油密度、硫含量、酸度、黏度和金属含量增加^[3], 从而形成稠油。

虽然 Kartsev 等人在 1959 年就提出原油厌氧生物降解这一观点^[4], 但在 20 世纪 80 年代前, 人们普遍认为地下原油生物降解主要是一个有氧过程^[3,5]。这主要是基于发现烃类在有氧条件下迅速降解, 而在缺氧条件下微生物降解石油十分缓慢, 所以烃类厌氧降解这一观点一直没有被广泛接受。近年来, 认为在地下深部油层原油生物降解过程主要是在缺氧条件下而不是在有氧条件下降解。并发现原油在微生物作用过程中, 除了导致原油稠化外, 另外还生成部分轻烃, 其中甲烷为主要产物^[6]。而且模拟实验也证明, 随着生物降解过程进行, 天然气组分变得更干而残余油变得更稠更重^[7]。

调查发现在地下生物降解成因稠油藏附近, 常常形成一些干气藏。这些气藏通常与生物降解稠油伴生, 并发现这些气藏主要是原油在缺氧条件下生

物降解形成的天然气, 称之为原油降解气或油层菌解气。在我国大多数含油气盆地中遭受生物降解油藏或稠油藏附近发现具有这些特征的气藏^[8-9]。

原油降解气研究在我国才刚刚起步。因此, 研究其生气机制及其特征, 建立原油降解气的判识指标, 并指出原油降解气的勘探前景, 对缓解当前能源危机和指导原油降解气的勘探都具有重要意义。

一、原油降解气的生气机制

原油进入到储集层后通常会遭受一系列的次生蚀变和调整改造, 特别是随油藏埋深的变浅, 原油通常会遭受水洗氧化或生物降解等作用, 形成稠油和天然气^[9]; 原油降解气是指原油在厌氧微生物降解过程中形成的以甲烷为主的次生型生物气^[9-10]。前人对原油原地微生物降解作用的研究表明, 50% 以上的油藏中原油都曾发生过微生物作用, 并生成了甲烷^[11]。

原油厌氧降解后生成的轻烃主要是甲烷。早在 225 年前, 就有微生物作用产生甲烷的记录^[11]。生物在降解原油的过程中, 一方面形成重油和沥青砂; 同时另一方面原油被厌氧微生物降解成氢/二氧化

^{*} 本文受到中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目“低熟气、生物气富集规律与资源评价技术”(编号: 10100026CQ09)的资助。本文作者还有中国石化中原油田测井公司的李良超。

作者简介: 王政军, 1979 年生, 硕士, 现从事天然气勘探工作。地址: (063004) 河北省唐山市路北区 51 号甲区冀东油田勘探开发研究院深层天然气勘探室。电话: 13832930357。E-mail: wzjun2007@126.com

碳和乙酸(醋酸)等简单代谢物后,最后产甲烷菌利用这些代谢产物生成甲烷。甲烷的生成可能主要有两种途径,一种是通过乙酸还原生成,另一种是通过氢/二氧化碳还原。油层产甲烷菌主要通过二氧化碳还原生成甲烷,很少有产甲烷菌通过乙酸裂解生成甲烷的报道^[12-13]。放射性示踪剂实验也证明二氧化碳还原生成甲烷比乙酸裂解生成甲烷更占优势^[14]。而且发现在产水层中乙酸浓度较高,这也进一步说明产甲烷菌主要通过二氧化碳还原生成甲烷。因此,在地下原油生物降解过程中,原油降解生成甲烷可能以二氧化碳还原途径为主^[14]。但发现在高浓度硫酸根离子存在的地方,很难形成原油降解气气藏,这是因为当油层地层水为高浓度硫酸根离子时,原油优先与硫酸盐还原菌作用生成硫化物甚至硫化氢和二氧化碳而抑制了原油与产甲烷菌作用。因此可以推测,在地下生物降解原油的过程中,通过二氧化碳还原生成甲烷是主要终端过程,而硫酸盐还原生成硫化物不明显^[10]。由于甲烷菌不具备直接分解有机质的能力,在与硫酸盐还原菌相竞争的同时,形成一条细菌活动的食物链。在链的终端,产甲烷菌得以生存主要依赖发酵菌和硫酸盐还原菌分解石油烃产生 CO_2 、 H_2 和乙酸等代谢物获得碳源与能源^[15]。在原油生物降解生成甲烷的过程中产甲烷菌生成甲烷的氢主要来源于水—烃破坏产生的氢^[21]。剩余的二氧化碳次生还原需要额外的氢源可以通过矿物水解^[16]和干酪根熟化^[15]提供,或来源于石油烃中脂环族或环烷—芳香环化合物芳构化^[6]。另外,油层微生物在降解原油生成甲烷过程中,氮、磷、钾和钴、镍等微量元素为微生物生存和繁殖提供营养物并促进微生物活动^[2]。

二、原油降解气特征

1. 原油降解气的地质条件

(1) 温度、埋藏深度及伴生原油成熟度

在原油降解生成甲烷的微生物中,主要贡献者是产甲烷菌,由于产甲烷菌活动温度一般低于 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$,最适宜其繁殖的温度为 $35\sim 42\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[17],故与原油降解气关联的油层古温度一般应低于 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。模拟实验表明,在 $35\sim 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间是产甲烷菌利用底物生成甲烷的高峰,并随着油层温度增加,生物降解生成甲烷速率降低,在超过 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,几乎不再生成甲烷^[18]。人们普遍认为在地质时代,有效的石油生物降解作用通常发生在温度低于 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的储层中,然而在一些现今油层温度低于 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的地层中,也经常发现未遭

受降解的原油,Wilhelms等人发现未降解原油局限于埋藏浅的冷盆地。这些盆地在地史中曾埋藏在地下更深、更热的部位,后经抬升作用变浅,这些油层在深埋过程中,温度超过 $80\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时经历了灭菌作用,使得深部生物圈中降解烃类的生物停止活动,尽管这些储层后期抬升到较冷的部位并再次发生石油充注,也不会发生生物降解作用,表明灭菌后的沉积物不再适合降解烃类的细菌生长^[19]。

一般来说,遭受微生物降解的油层一般埋藏较浅,主要分布在 $2\,500\text{ m}$ 以浅范围(图1、2)^[2]。这就决定了生物降解原油形成的原油降解气多分布在中、浅层,一般分布在浅于 $2\,500\text{ m}$ 或更浅的储层。在我国原油降解气埋藏深度一般小于 $1\,500\text{ m}$,如松辽西斜坡原油降解气埋藏深度只有 $600\sim 800\text{ m}$ 。还发现原油降解气对应的生物降解原油成熟度一般为中—低等成熟度, R_o 为 $0.5\%\sim 0.9\%$ 都有分布,而在 $R_o>0.9\%$ 时几乎没有生物降解原油。

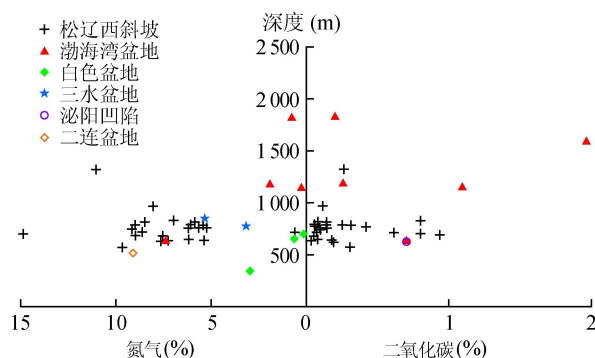


图1 氮气、二氧化碳含量和深度的相关关系图

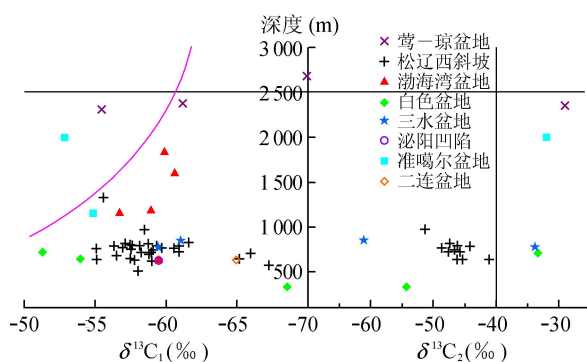


图2 甲烷、乙烷碳同位素值和深度的相关关系图

(2) 储集层特征

与原油降解气相关的生物降解原油的储层岩性大多为碎屑岩,且一般分布在油水界面附近^[2,6,15],很少分布在致密碳酸盐岩储层或源岩中。这是因为粒径、岩性、孔隙度和渗透率能够极大的影响微生物活动。孔隙发育,可为产甲烷菌(约 $10\text{ }\mu\text{m}$)的活动

提供充足空间;且连通的岩石组构比致密的岩石组构能为营养物和细菌运动提供更好的条件^[20]。而大多数碳酸盐岩或源岩是孔隙直径小于4 μm 且低渗透率的细粒岩石,导致微生物很难进入。在油水界面附近,烃向油水界面扩散,被利用油柱下部水饱和和带营养物生活在油水界面的微生物降解^[2]。营养物(如磷)通过缓冲矿物溶解反应即水—岩溶解平衡得到,在降解发生同时,新油不断充注到储层形成降解平衡^[12]。而且前面从微生物营养物方面也说明砂岩储集层更为有利于微生物降解原油。另外,原油降解气储层时代一般比较新,我国原油降解气主要分布在白垩纪以新的地层中。

(3) 地层水特征

原油降解气的生成地质影响因素除了跟温度和与之相关的生物降解原油储层性质有关外,也跟含油气系统内的地层水有关。调查发现,原油降解气大多发生在 NaHCO_3 型和 CaCl_2 型地层水的含油气系统中,而在高浓度硫酸根离子存在的地方,即水型为 Na_2SO_4 时,很难形成原油降解气藏^[2]。同时发现,通常高矿化度抑制产甲烷菌活动,不利于生物甲烷生成,而在中低矿化度产甲烷菌活动较好,有利于产甲烷菌利用底物生成甲烷。因此,中—低矿化度的 NaHCO_3 型或 CaCl_2 型地层水有利于微生物的繁殖及其对原油降解进而生成甲烷。

(4) 原油降解气与生物降解稠油的关系

调查研究发现,在地下被生物降解原油或生物降解成因稠油藏附近,常常形成一些干气藏。这些气藏都是以油藏的溶解气、气顶气、油环气或是油藏上方气层气等形式出现^[6-7],即原油降解气与生物降解稠油具有很好伴生关系。这些气藏的气主要是原油在缺氧条件下生物降解生成的甲烷。统计发现,在我国大多数含油气盆地被生物降解油藏或稠油藏附近发现具有这些特征的气藏,除了在松辽盆地西斜坡、渤海湾盆地和准噶尔盆地西北缘等一些大型含油气盆地外,在二连盆地等一些小型盆地的稠油油藏附近的气藏也有原油降解气藏分布。

2. 原油降解气地球化学特征

(1) 组分特征

原油厌氧降解生成的主要产物是甲烷,甲烷含量一般在95%以上(图3)。生物在降解原油过程中,降低了原油的气/油比,导致混入部分溶解气,所以原油降解气组分除甲烷外还含有少量的乙烷及乙烷以上的重烃,重烃含量主要在0.5%~5%,通常小于1%,并随着生物降解程度的增加,形成的天然气

组分更干^[7]。油田强烈的生物降解是干气形成的主要来源,甲烷作为深部石油被微生物降解生成的主要副产物^[7]。虽然热生作用在一定的温度和压力下,也可破坏石油烃的化学结构,产生甲烷等多种烃类。但热生作用产物中烃类物质的范围比较大,除甲烷外,还存在分子量较大的烃类物质^[11]。另外与热裂解形成的天然气不同的是,原油降解气通常与生物降解原油伴生^[10]。

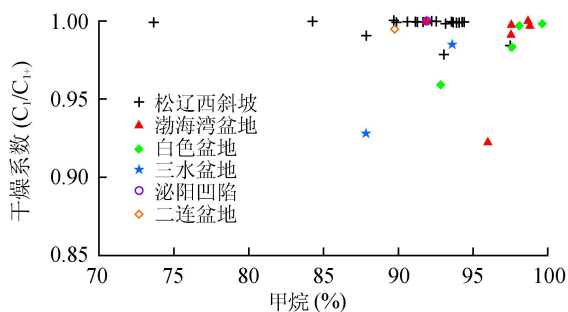


图3 甲烷含量和干燥系数的相关关系图

其次,原油降解形成的气藏中常含一定量的 N_2 及少量 CO_2 和 H_2 。气藏中 N_2 的含量通常比常规气藏高(图2),且 N_2 含量高的气藏主要分布在浅层,在松辽盆地北部西斜坡,在杜13井原油降解气中 N_2 含量高达14.86%,深度一般在600~800 m范围内(图2),研究认为 N_2 含量高是喜氧细菌和厌氧细菌共同作用的结果。其形成可能首先通过喜氧细菌作用,降解、分解高分子烃类产生低分子化合物。这一过程对原油具有极大的破坏作用,产生 CO_2 ,且逐步消耗 O_2 ,经过中间兼性细菌作用,最后 O_2 消耗殆尽而剩下 N_2 过渡到厌氧作用。

(2) 同位素特征

甲烷的生成是一个独特的厌氧过程,通常甲烷同位素具有典型的生物甲烷碳同位素特征。甲烷碳同位素值小于-45‰^[21-22],通常小于-55‰;而热成因甲烷的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值分布在-30‰~-45‰。并随着深度增加,甲烷同位素有变重的趋势(图3)。微生物优先消耗石油烃中的 ^{12}C 。因此,微生物甲烷含有较少的 ^{13}C 与 ^{14}C 同位素,导致地层水中溶解态无机碳的 ^{13}C 与 ^{14}C 同位素呈富集态,即 ^{13}C 更多地保留到残留的 CO_2 中^[16]。可见在这一过程中存在强烈的碳同位素分馏作用,所以原油降解气中甲烷的碳同位素值呈高负值特征(-75‰~-45‰)^[23-24];而 CO_2 却显示出异常重的碳同位素值^[11,25], CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值小于-25‰,最重可以达到15‰左右^[2]。如此重的二氧化碳碳同位素是产甲烷菌优先选择 ^{12}C 消耗的

结果,而不是无机成因二氧化碳的标志。甲烷的碳同位素特征与溶解无机碳的同位素特征是识别原油降解气的两大重要指标。据统计,我国原油降解气 $\delta^3\text{C}_1$ 值范围一般分布在 $-75\text{‰}\sim-45\text{‰}$ (图3)。

甲烷的生成通常与被生物降解油层相关及甲烷同位素变轻,但由于原油降解气分布在浅层,易与其他成因类型的天然气发生混合,如经常发现与热成因甲烷混合^[24]导致部分原油降解气甲烷同位素变重。

三、综合判识指标

地质背景分析和天然气地球化学特征是判识原油降解气的主要手段,以烃源岩和地质条件为基点,建立了原油降解气的判识标志。

1. 地球化学指标

原油降解气最主要的地球化学标志是:① $\delta^3\text{C}_1$ 为 $-75\text{‰}\sim-45\text{‰}$,介于原生生物气与热解油型气之间,并有随着深度增加,甲烷同位素变重的特点(图3)。②烷烃系列碳同位素组成为 $\delta^3\text{C}_1<\delta^3\text{C}_2$,属有机成因气碳同位素正常序列;且 CO_2 富集 ^{13}C 等特征。甲烷碳同位素轻和与之关联的地层水中溶解态无机碳(DIC) ^{13}C 与 ^{14}C 同位素呈富集是识别原油降解气的两大重要指标。③以甲烷为主伴生一定量重烃,但重烃含量很低,通常小于1%。④地层水以 NaHCO_3 型或 CaCl_2 型和中低矿化度的淡水—微咸水沉积为主。储层埋深一般小于2 500 m,并有较高的 N_2 含量。

2. 原油降解生成甲烷的地质标志

原油降解气大多分布在孔渗性比较好的砂岩储层中,而很少分布在致密的碳酸盐岩储层中;其次,与原油降解气关联的生物降解原油成熟度一般为低成熟—成熟,这是与原生生物气的最大区别,也不同于裂解气的过成熟。其次原油降解气与与之相关的生物降解油层伴生并存在油水界面。

总之,原油降解气的判识标志主要为:组分干、甲烷同位素轻和二氧化碳同位素异常重并与生物降解稠油伴生。

四、勘探前景

实际上,原油降解气的形成过程是原油在厌氧条件下被微生物改造利用再生成的过程。在我国许多含油气盆地中,原油厌氧细菌降解作用非常普遍,油层微生物厌氧降解占主导,但与喜氧细菌降解原油不同的是,它在使原油性质变差的同时,又能再生成甲烷,形成原油降解气^[13]。

研究发现,生物成因稠油油藏储量与原油降解气的储量具有很好的线性关系,即生物成因稠油油藏储量越大,原油降解气的储量也相对越大;反之原油降解气的储量也相对越小^[13]。

稠油是全球石油资源的重要组成部分,通常估计稠油资源量为常规石油的10倍以上^[26]。我国稠油资源也具有较大的潜力,比常规石油资源和可采储量高3~4倍。我国稠油资源分布很广,在20个盆地(或拗陷)中发现了近百个稠油油藏^[27]。稠油资源量约 $250\times 10^8\text{ t}$,占我国石油总资源的25%~30%^[27],累计探明稠油储量近 $50\times 10^8\text{ t}$,预计中国稠油资源量可逾 $300\times 10^8\text{ t}$ ^[1]。从成因上讲,稠油主要是由正常原油生物降解形成^[2],且稠油降解程度和生成甲烷量也具有相关性。在相同条件下,原油降解程度越高,生成原油降解气越多;而在降解程度较低的稠油中,生成原油降解气量越小。所以,生物降解原油过程中同步产生的生物甲烷潜力也应该是巨大的。由此可知,我国原油降解气勘探潜力巨大。

五、结 论

原油降解气以干气为主,主要成分是甲烷,乙烷以上的重烃类含量甚微,非烃中 N_2 含量较高。甲烷的碳同位素值呈高负值特征,一般介于生物气与热解气之间。由于在 $\text{CO}_2\text{—CH}_4$ 系统中的热力学同位素交换反应中有利于 CH_4 富集 ^{12}C ,而 ^{13}C 却更多地保留到残留的 CO_2 中,因此原油降解气中伴生的 CO_2 显示出异常重的碳同位素值。并具有储层时代新、埋藏浅、能大规模聚集成藏的特点。

产甲烷菌的大量繁殖与活动是原油降解成气的重要条件,而微生物生存繁殖离不开水。因此适宜微生物的繁殖条件和油—水界面的存在等对原油降解气的形成都具有重要的影响。

原油降解气一般分布在稠油附近,以油藏的溶解气、气顶气、油环气或是油藏上方气层气的形式出现。我国具有丰富的稠油资源,其中,绝大部分稠油是正常原油通过生物降解形成的,而生物降解原油过程中同步产生的生物甲烷潜力也应该是巨大的^[28]。根据现有资料已经确认的原油降解气藏表明,我国的原油降解气分布十分广泛,可供勘探的地区很多,并有可能成为我国生物气勘探的主要类型。

参 考 文 献

- [1] 牛嘉玉,刘尚奇,门存贵,等.稠油资源地质与开发利用[M].北京:科学出版社,2002:1-212.

- [2] HEAD I, JONES D M, LARTER S R. Biological activity in the deep subsurface and the origin of heavy oil[J]. *Nature*, 2003, 426: 344-352.
- [3] HUNT J M. Petroleum geochemistry and geology[M]. Freeman and Co, 1979: 617-620.
- [4] KARTSEV A A, TABASARANSKII Z A, SUBBOTA M I, et al. Geochemical methods of prospecting and exploration for petroleum and natural gas[M]. Berkeley, California: California Press, 1959.
- [5] WINTERS J C, WILLIAMS J A. Microbial alteration of crude oil in the reservoir[J]. *American Chemistry Society Division of Petroleum Chemists, Preprints*, 1969, 14: 22-31.
- [6] LARTER S R, HEAD I M, HUANG H P, et al. Oil to gas slowly-Biodegradation, gas destruction and methane generation in deep subsurface petroleum reservoirs[C]// *Proceedings of the petroleum geology in NW Europe*. in Press. [S.l.]: The Geological Society, London, United Kingdom, 2003: 633-639.
- [7] LARTER S R, DI PRIMIO R. Effects of biodegradation on oil and gas field PVT properties and the origin of oil rimmed gas accumulations [J]. *Organic Geochemistry* 2005, 36: 299-310.
- [8] LARTER S R, HOCKEY A, APLIN A, et al. When biodegradation preserves petroleum ! petroleum geochemistry of N. Sea Oil Rimmed Gas Accumulations (ORGAs) [J]. Abstract. AAPG Hedberg Research Conference-Natural Gas Formation and Occurrence, Durango, Colorado, 1999: 4.
- [9] ZHU GUANGYOU, ZHANG SHUICHANG, JIN QIANG, et al. Origin of the Neogene shallow gas accumulations in the Jiyang Superdepression, Bohai Bay basin[J]. *Organic Geochemistry* 2005, 36(12): 1650-1663.
- [10] 李赞豪. 具有广阔勘探前景的一种新型浅层天然气: 油层、煤层厌氧菌解再生物气[J]. *石油实验地质*, 1994, 16(3): 220-229.
- [11] FINKELSTEIN M, DEBRUYN R, WEBER J, et al. Buried hydrocarbons: A resource for biogenic methane generation[J]. *World Oil*, 2005, 226(8): 61-68.
- [12] KOTELNIKOVA S. Microbial production and oxidation of methane in deep subsurface [J]. *Earth Science Reviews*, 2002, 58: 367-395.
- [13] HEIDER J, SPORMANN A M, BELLE H R, et al. Anaerobic bacterial metabolism of hydrocarbons[J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 1999, 22: 459-473.
- [14] ZENGLER K, RICHNOW H H, ROSSELLO-MORA R, et al. Methane formation from long-chain alkanes by anaerobic micro-organisms[J]. *Nature*, 1999, 401: 266-269.
- [15] DIECKMANN V, MER S, SCHENK H J, et al. Feeding the deep biosphere: kinetics of abiotic substrate formation for deep methanogenic activities[C]// Paper presented at the William Smith Meeting. London: Geological Society, 2002.
- [16] CHARLOU J L, DONVAL J P, FOUQUET Y, et al. Geochemistry of high H₂ and CH₄ vent fluids issuing from ultramafic rocks at the rainbow hydrothermal field (36 degrees 14' N, MAR)[J]. *Chem Geol*, 2002, 191: 345-359.
- [17] ZEIKUS J G. Chemical and fuel production by anaerobic bacteria[J]. *Annual Review of Microbiology*. 1980, 34: 423-464.
- [18] 李明宅, 张洪年. 生物气成藏规律研究[J]. *天然气工业*, 1997, 17(2): 6-10.
- [19] WILHELMS A, LARTER S R, HEAD I M, et al. Biodegradation of oil in uplifted basins prevented by deep-burial sterilisation[J]. *Nature*, 2000, 411: 1034-1037.
- [20] KRUMHOLZ LEE R. Microbial communities in the deep subsurface[J]. *Hydrogeology Journal*, 2000, 8(1): 4-10.
- [21] HORSTAD I, LARTER S R. Petroleum migration, alteration and remigration within Troll Field, Norwegian North Sea[J]. *AAPG Bulletin*, 1997, 81: 222-248.
- [22] WILFRED F M, RLING, HEAD I M, et al. Mini-review-The microbiology of hydrocarbon degradation in subsurface petroleum reservoirs: perspectives and prospects[J]. *Research in Microbiology*. 2003, 154: 321-328.
- [23] WENGER L M, DAVIS C L, ISAKSEN G H. Multiple controls on petroleum biodegradation and impact in oil quality[C]. [S.l.]: Society of Petroleum Engineers, 2001.
- [24] 戴金星. 各类烷烃气的鉴别[J]. *中国科学*, 1992(2): 185-193.
- [25] DAI JINXING, CHEN YING. Characteristics of carbon isotopes of alkane components and identification marks of biogenic gases in China[J]. *Science in China (series B)*, 1994, 37(2): 231-241.
- [26] 胡见义, 牛嘉玉. 中国重油和沥青砂资源[J]. *世界石油工业*, 1998, 5(9): 13-19.
- [27] 胡见义, 牛嘉玉. 中国重油沥青资源的形成与分布[J]. *石油与天然气地质*, 1994(2): 105-112.
- [28] 朱光有, 张水昌, 赵文智, 等. 中国稠油区浅层天然气地球化学特征与成田机制[J]. *中国科学: D 辑 地球科学*, 2007, 37(增刊).

(修改回稿日期 2008-09-05 编辑 居维清)