

大兴安岭西缘贺斯格乌拉凹陷白垩系烃源岩生烃潜力与天然气成因

孙砚泽¹, 李世臻^{2*}, 刘卫彬², 刘岩¹, 柯昌炜¹, 徐耀辉¹

SUN Yanze¹, LI Shizhen^{2*}, LIU Weibin², LIU Yan¹, KE Changwei¹, XU Yaohui¹

1. 油气资源与勘探技术教育部重点实验室(长江大学), 湖北 武汉 430100;

2. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083

1. Key Laboratory of Ministry of Education of Oil and Gas Resources and Exploration Technology (Yangtze University), Wuhan 430100, Hubei, China;

2. Oil and Gas Resources Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China

摘要:大兴安岭西缘贺斯格乌拉凹陷为新发现凹陷,其潜在烃源岩的生烃潜力及天然气成因尚未有过系统研究。对该凹陷3口参数井及部分煤田探井白垩系160块岩心样品进行有机岩石学、有机地球化学等分析,结合构造、沉积特征,系统分析了该凹陷白垩系泥岩生烃潜力,探讨了贺地1井天然气的成因类型。贺斯格乌拉凹陷下白垩统暗色泥岩有机质丰度较高,腾格尔组一段一般泥岩 TOC 平均为 2.20%,腾格尔组二段 TOC 平均为 3.67%;以 II₁—II₂ 型有机质为主;成熟度较低,目前处于未熟—低熟阶段。贺地1井天然气甲烷碳同位素较轻,含量为-70.5‰~-68.2‰,结合甲烷氢同位素特征,认为该井天然气为生物成因气,二氧化碳还原与乙酸发酵混合生成。因所采岩心样品普遍浅于 1000 m,推测凹陷深部(大于 2000 m)已进入生油高峰期,具有一定的油气勘探潜力。

关键词:大兴安岭西缘;贺斯格乌拉凹陷;白垩系;烃源岩;生烃潜力;天然气

中图分类号:P534.53;P618.13 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)09-1484-09

Sun Y Z, Li S Z, Liu W B, Liu Y, Ke C W, Xu Y H. Hydrocarbon generation potential and gas genesis of Cretaceous source rocks in Hesigewula Sag, western margin of Great Khingan. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(9): 1484-1492

Abstract: The Hesigewula Sag on the western margin of the Great Khingan is a newly-discovered sag where the hydrocarbon generation potential of its potential source rocks has not been systematically studied. Based on the analysis of organic petrology and organic geochemistry of 160 core samples from three parameter wells and some coalfield exploration wells in the Hesigewula Sag, and combined with tectonic and sedimentary characteristics, the hydrocarbon generation potential of Cretaceous mudstone in the Hesigewula Sag is systematically analyzed. The genetic types of natural gas in Well Hedi 1 are also discussed. The total organic carbon of Lower Cretaceous dark mudstone in Hesigewula Sag is high. The average TOC of K₁bt₁ mudstone is 2.20% and the K₁bt₂ is 3.67%. The type of the organic matter is II₁—II₂. The degree of thermal evolution is relatively low, and it is at the stage of immature—low maturity. The carbon isotope of methane in Well Hedi 1 is relatively light, with contents ranging from -70.5‰ to -68.2‰. Combined with the hydrogen isotope characteristics of methane, it is considered that the natural gas in Well Hedi 1 is biogenic gas, which is produced by the mixture of carbon dioxide reduction and acetic acid fermentation. Because the core samples are generally collected less than 1000 meters at depth, it is presumed that the deep part of the depression (more than 2000 meters) has entered the peak period of oil generation, which has a certain exploration potential.

Key words: western margin of Great Khingan; Hesigewula Sag; Cretaceous; source rock; hydrocarbon generation potential; gas genesis

收稿日期:2019-12-02;修订日期:2020-03-19

资助项目:中国地质调查局项目《大兴安岭西缘断陷白垩系烃源岩生烃潜力评价及热演化史》(编号:DD20160202)和中海石油(中国)有限公司天津分公司项目(编号:CCL2020TJT0NST1956)

作者简介:孙砚泽(1993-),男,博士,从事油气地球化学研究。E-mail:632885418@qq.com

* 通信作者:李世臻(1982-),男,博士,教授级高工,从事油气调查和石油地质综合研究工作。E-mail:lishz2006@sina.com

大兴安岭西缘地区地处祖国边陲,地质条件复杂,火山岩较发育,其油气前景有待深入探索^[1]。在前期的研究中通过物探、钻井等手段,查明了研究区中生界凹陷的规模及结构,烃源岩的分布及凹陷的含油气性^[2-3];根据凹陷的埋深、面积、烃源岩规模等条件,查明了该凹陷的地层展布和结构,总结了阿尔善组-腾格尔组发育的主要沉积相^[4],获取了烃源岩评价参数,但以上研究并未对凹陷腾格尔组一段和腾格尔组二段的生烃潜力进行详细的分类评价,生物标志物特征信息也未有提及,尤其是研究区的天然气成因问题尚未有相关研究。因此,本文将3口探井的烃源岩样品进行层位上的整理并结合分析测试及凹陷内生物标志物特征信息,对该地区的生烃潜力进行系统的探讨,通过天然气组分和同位素分析明确研究区天然气的成因。

1 地质背景

贺斯格乌拉凹陷位于大兴安岭西缘二连盆地东北部,面积约538 km²(图1),受北东向和北西向断裂控制,主体为断陷沉积^[4]。贺斯格乌拉凹陷构造位置处于二连-贺根山深断裂以北的大兴安岭微板块上,与东北地区其他早白垩世断陷湖盆具有相似性^[5],同属古生代褶皱基底上发育的盆地-山岭型裂陷盆地,是东北亚裂陷盆地系的组成部分。区内的褶皱和断裂构造较发育,主要呈北东向,发育了较厚的陆相沉积地层^[6-7]。依据重磁电勘探工程与综合分析结果,划分出西部凸起、中部凹陷、东部凸起3个二级构造单元(图1)^[4]。

贺斯格乌拉凹陷白垩系自下而上分为阿尔善组、腾格尔组(一段和二段)、赛汉塔拉组^[1]。阿尔善组主要为火山凝灰岩。腾格尔组一段岩性主要为细砂岩、中-粗砂岩和厚层泥岩;腾格尔组二段主要岩性为泥岩、粉砂岩、中-粗粒砂岩、粉砂质泥岩、细砂岩,夹煤层,底部发育多套细砂岩至含砾中粗砂岩旋回,腾格尔组泥岩是二连盆地普遍发育的烃源岩。赛汉塔拉组岩性主要为泥岩、粉砂质泥岩、中-粗砂岩和含砾砂岩^[4]。

2 构造沉积特征

根据二维地震解释剖面,贺斯格乌拉凹陷为一个典型的西断东超的单断箕状断陷,走向近北东向,整体构造特征为北低南高、西低东高。从西到东分别形成西部陡坡带、中部洼陷带和东部缓坡带^[4]。

贺斯格乌拉凹陷是在东北亚地区整体构造运动背景下形成的下白垩统沉积断陷,主要受燕山晚期断陷构造运动作用控制^[8-9],根据地震剖面解释和钻井揭示的岩性特征,将下白垩统演化划分为4个阶段^[10],分别为初期裂陷阶段、裂陷发育阶段、坳陷阶段、抬升剥蚀阶段。

(1)初期裂陷阶段:为阿尔善组沉积时期,西部边界断层剧烈活动,东部斜坡对偶断层形成,沉降中心位于西部,沿边界断层展布。裂陷内水体较浅,物源较近,主要来自两侧的西部凸起和东部凸起,沉积了一套巨厚的火山凝灰岩和粗碎屑沉积岩^[4],沉积中心部位可能发育泥岩。

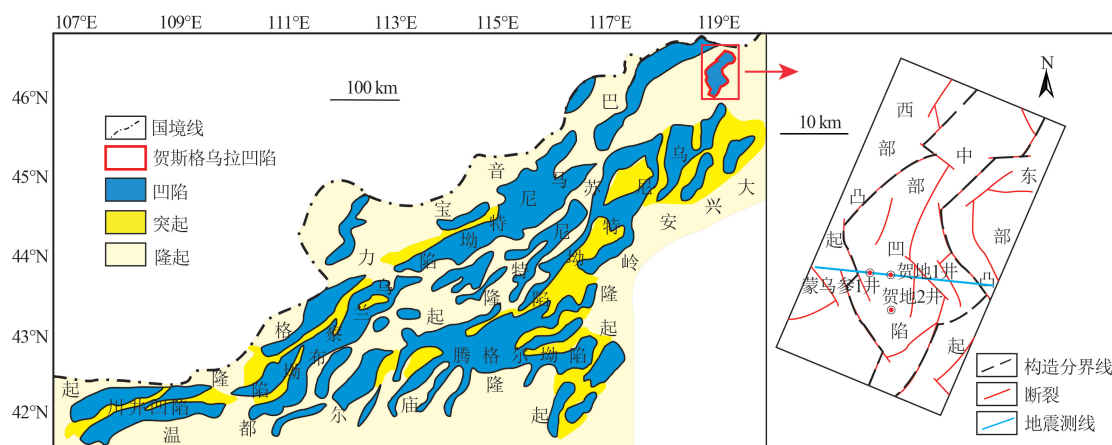


图1 二连盆地贺斯格乌拉地区构造单元^[4]

Fig. 1 Structural units of the Hesigewula area in Erlian Basin

(2) 裂陷发育阶段: 为腾格尔组沉积时期, 西部边界断层持续活动, 东部对偶断层停止活动, 凹陷由双断层逐步转化为单断箕状结构。西部陡坡带沉积体系以冲积扇为主, 东部缓坡带沉积体系以扇三角洲为主, 湖盆中心发育深湖相泥岩^[4]。

(3) 坳陷阶段: 为赛汉塔拉组沉积时期, 构造活动由断陷转为坳陷, 由深湖过渡到浅湖。地势相对平缓, 沉积体系由扇三角洲过渡为辫状河三角洲沉积。构造活动以坳陷为主, 并且决定了凹陷现今的构造格架。

(4) 抬升剥蚀阶段: 赛汉塔拉组沉积末期, 古生界基底连同白垩系沉积盖层整体缓慢抬升, 凹陷遭受不同程度的剥蚀, 东部缓坡带抬升作用更明显, 遭受剥蚀严重, 现今面貌保留了原有的构造格局。

结合地震解释地层厚度分布, 以沉积相分布和相应的泥地比参数为控制约束条件, 得到腾一段和腾二段泥质烃源岩的厚度分布图(图 2)。从图 2 可

以看出, 腾一段烃源岩主要分布在盆地中南部, 受断层控制明显, 表现为断陷型分布特征。靠近断层烃源岩发育好, 厚度大, 最厚超 400 m, 向东北方向逐渐变薄, 呈环形分布。腾二段烃源岩受沉积沉降控制作用明显, 盆地沉积中心分布较厚, 向盆地边缘隆起变薄^[4], 展现为坳陷沉积特征。

根据凹陷内 3 口钻井的岩心观察, 结合岩性组合特征、电性特征、岩矿特征、地震测井相等分析数据, 在贺斯格乌拉凹陷的阿尔善组-腾格尔组主要识别出 3 种沉积相, 分别为扇三角洲、辫状河三角洲和湖泊相。

贺地 1 井和贺地 2 井, 钻遇了厚层下白垩统暗色泥岩、粉砂质泥岩, 两井在腾一段均出现明显的气测异常(图 3), 尤其是贺地 1 井, 685.13~707.45 m 井段, 普遍见到气测高值, 气测全烃异常可达 50% 以上, 最高可达 64.183%, 而且气测全烃中以甲烷为主, 具有较好的成藏潜力, 预测深部烃源岩更

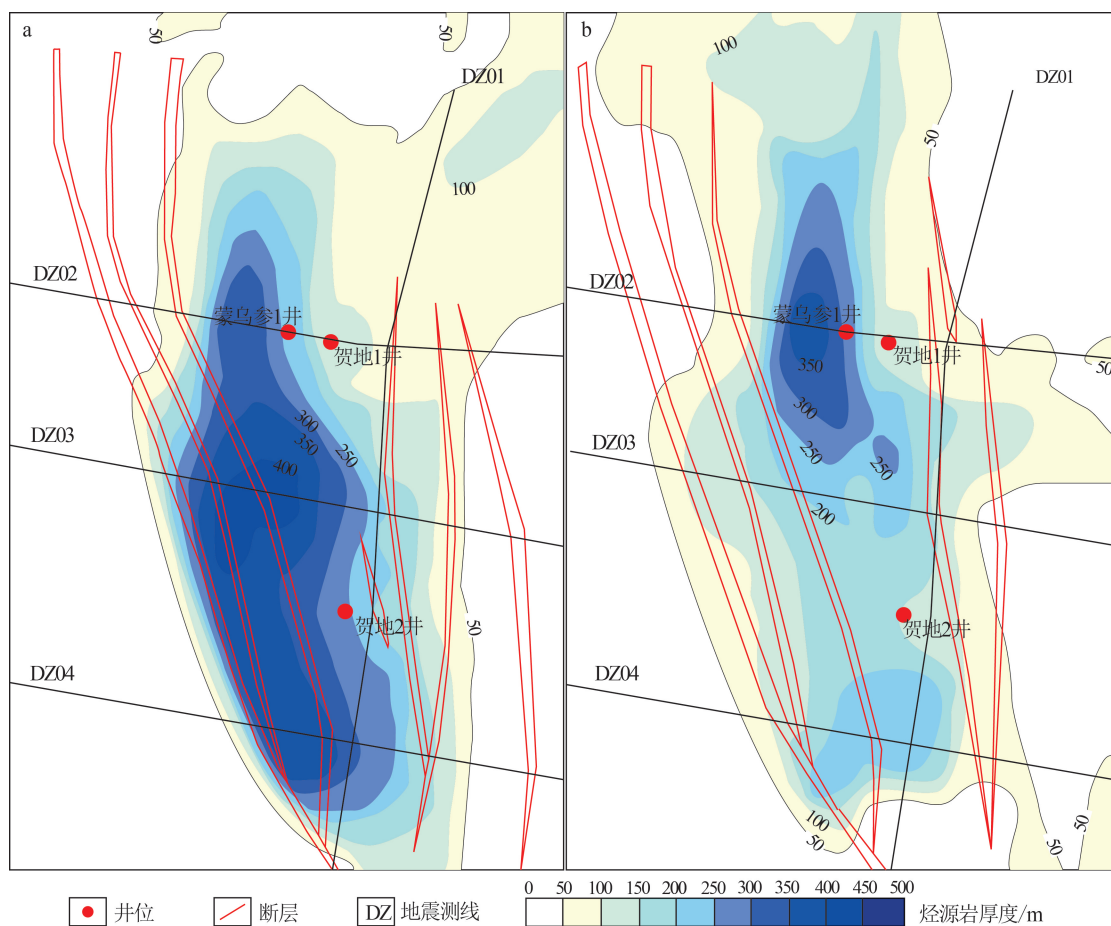


图 2 贺斯格乌拉凹陷腾一段(a)和腾二段(b)泥质烃源岩厚度分布

Fig. 2 Thickness of argillaceous source rocks in K_1bt_1 (a) and K_1bt_2 (b) in Hesigwula Sag

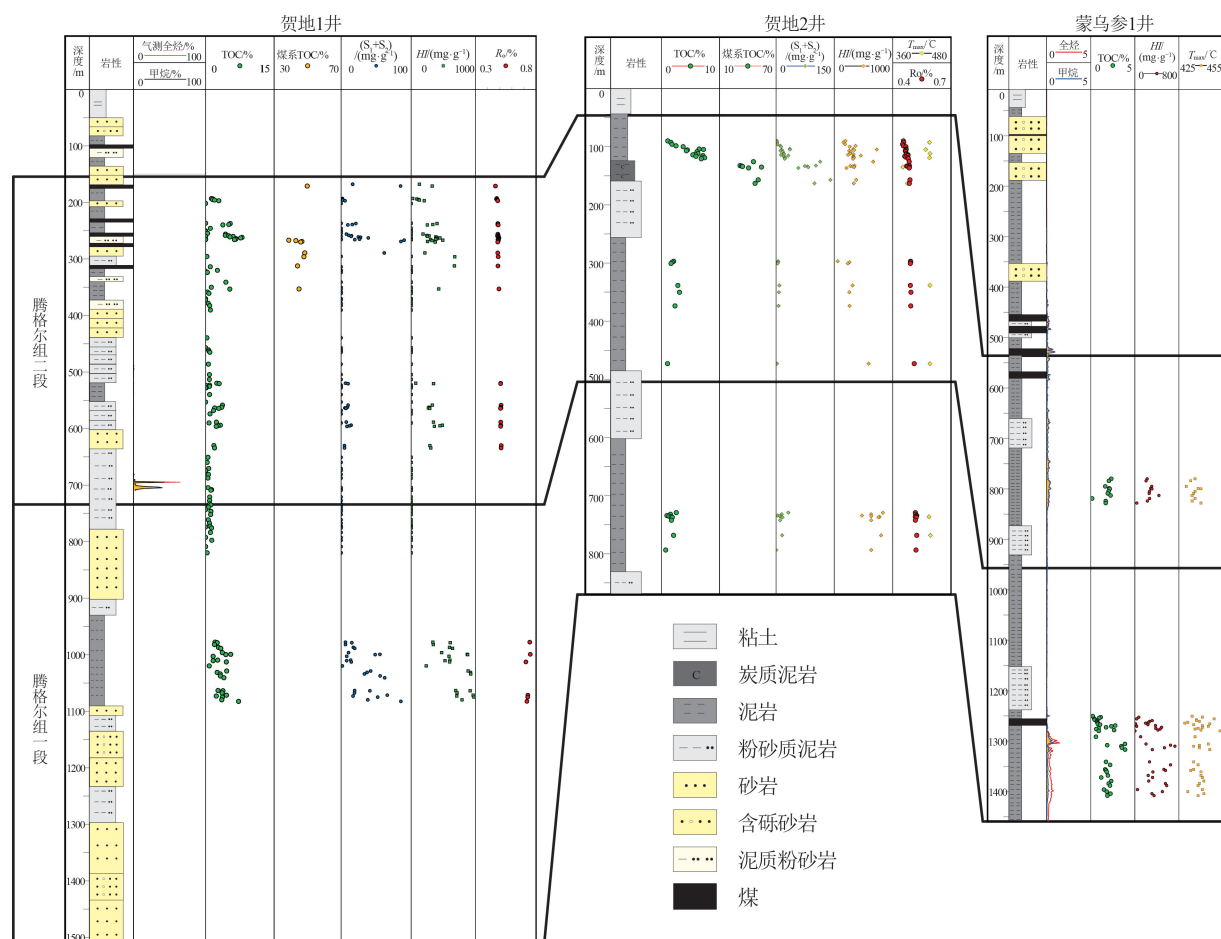


图 3 贺地 1 井、贺地 2 井和蒙乌参 1 井腾格尔组烃源岩连井对比

Fig. 3 Contrast diagrams of hydrocarbon source rocks of the Tengger Formation in Hedi 1, Hedi 2 and Mengwucan 1 wells

有利。蒙乌参 1 井构造位置位于贺斯格乌拉凹陷缓坡带,通过这 3 口井证实贺斯格乌拉凹陷白垩系泥岩发育,具有良好的生烃潜力。

3 烃源岩评价

3.1 有机质丰度特征

有机质是烃源岩中油气生成的物质基础,也是衡量烃源岩生烃潜力大小的重要参数^[11]。在其他条件相近的前提下,岩石中有机质丰度越高,生烃能力越强。本文以陆相烃源岩有机质丰度评价指标与含煤地层泥岩和炭质泥岩有机质丰度评价标准^[12]为依据,对贺斯格乌拉凹陷腾一段与腾二段 142 个泥岩样品与腾二段 18 个炭质泥岩样品进行了综合评价。

从连井对比图和 TOC 的统计分析看,腾二段与腾一段泥岩样品 TOC 平均值分别达到 3.67% 和

2.20%,其中 TOC>1% 的样品分别占样品总数的 98% 和 76%(图 4)。腾二段与腾一段生烃潜力平均值分别达到 11.79 mg/g 和 13.95 mg/g,其中大于 6 mg/g 的样品占样品总数的 64% 和 54%。腾二段炭质泥岩样品的 TOC 均大于 10%,生烃潜力均大于 20 mg/g。

综合有机碳含量和生烃潜力 2 项指标,腾一段泥岩表现为好烃源岩特征,腾二段炭质泥岩和泥岩达到很好—好烃源岩标准。从氢指数和有机碳关系图(图 5)可以看出,腾二段有机质丰度略高于腾一段。

3.2 有机质类型

贺斯格乌拉凹陷腾二段氢指数分布范围为 24~727 mg/g,平均值为 309 mg/g;腾一段烃源岩氢指数分布范围为 16~1014 mg/g,平均值为 519.5 mg/g,腾一段氢指数高于腾二段烃源岩,从氢指数与 T_{max} 的

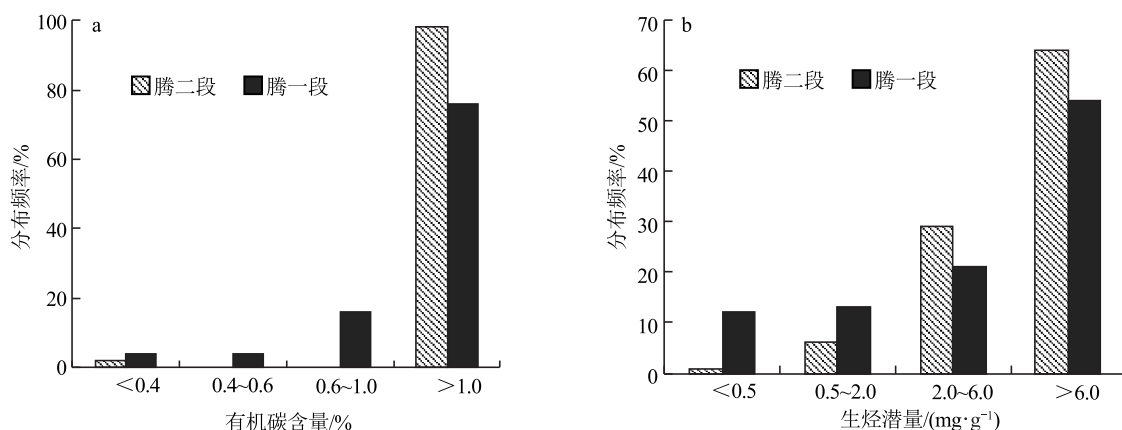


图4 有机碳含量(a)和生烃潜量(b)统计直方图

Fig. 4 Histogram of total organic carbon(a) and hydrocarbon generation potential(b)

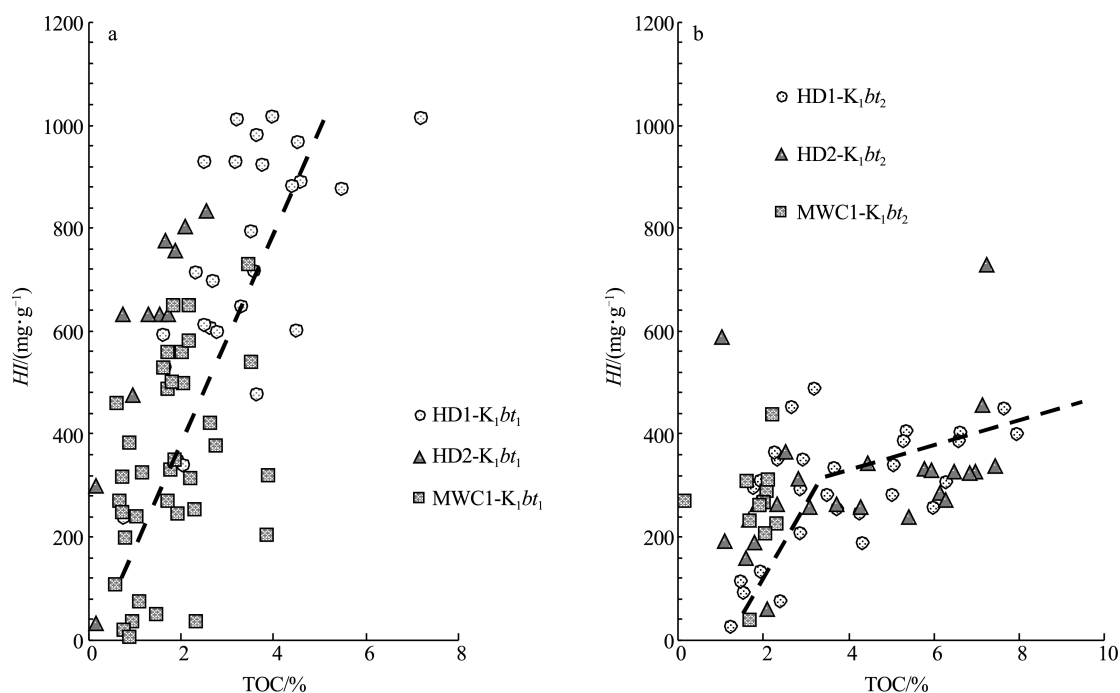


图5 腾一段(a)和腾二段(b)烃源岩 TOC 与氢指数关系

Fig. 5 Relation between TOC and HI of source rocks in the in K₁bt₁(a) and K₁bt₂(b)

相关类型图看,腾一段烃源岩主要为Ⅱ₁型有机质,Ⅰ型有机质次之,Ⅲ型有机质最少;腾二段主要为Ⅱ₁—Ⅱ₂型有机质,少量Ⅰ型和Ⅲ型有机质(表1;图6)。

从O/C原子比H/C原子比范氏图看(图7),腾二段烃源岩有机质以Ⅱ₂型为主,腾一段部分样品类型较好,达到Ⅱ₁型的标准。综上所述,虽然3种分析结果略有差异,但总体特征表明,腾格尔组烃

源岩为Ⅱ₁—Ⅱ₂型有机质,其中腾一段有机质类型略优于腾二段,这可能与腾一段更近于凹陷中心有关。

3.3 有机质成熟度

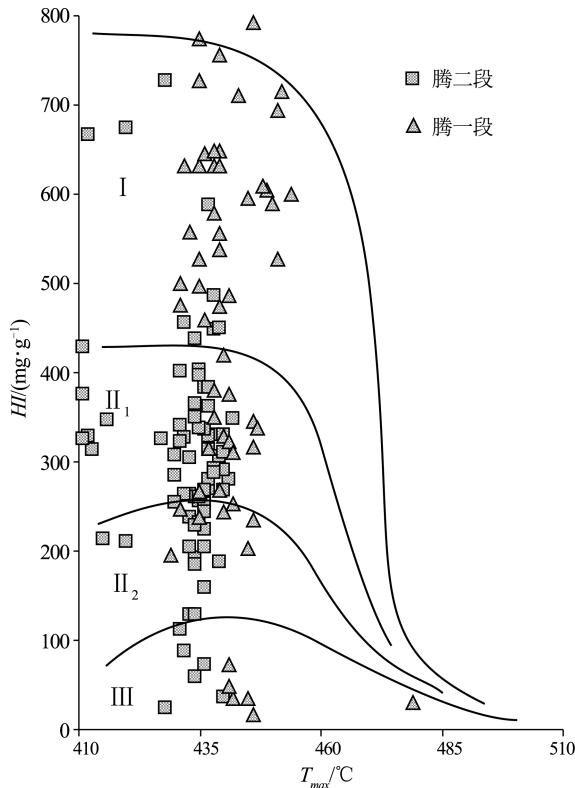
沉积岩中有机质丰度和有机质类型是生成油气的物质基础,但有机质只有达到一定的热演化程度才能开始大量生烃^[11,13]。因此,成熟度是决定烃源岩是否是有效油气源岩的关键。有机质成熟度代表

表 1 腾一段与腾二段氢指数分布

Table 1 Hydrogen index distribution of K_1bt_1 and K_1bt_2

地层	腾二段	腾一段
$HI/(mg \cdot g^{-1})$	309(84)	519.5(72)
	24~727	16~1014

注: 309(84), 309 为均值; 84 为样品数; 24~727, 24 为最小值; 727 为最大值; 腾一段类似

图 6 腾一段与腾二段 HI 与 T_{max} 划分类型Fig. 6 Classification of HI and T_{max} in K_1bt_1 and K_1bt_2

沉积有机质向石油转化的热演化程度, 是表征有机质成烃有效性和产物性质的重要参数^[14], 较好的有机质成熟度有利于油气的大量生成。不同的有机质类型, 其成熟度指标略有不同^[15]。本文主要应用 T_{max} (热解最高峰温) 研究有机质的成熟度特征, 结合现有样品点的镜质组反射率 (R_o) 分析数据进行评判。

腾二段烃源岩样品 T_{max} 值 61% 小于 435 °C, 处于未成熟带内, 39% 在 435~445 °C 之间, 处于低成熟生油带内; 腾一段烃源岩样品 T_{max} 值 22% 小于 435 °C, 处于未成熟带内, 46% 在 435~445 °C 之间, 处于低成熟生油带内, 32% 在 445~480 °C 之间, 处于成熟生油带内 (图 8)。

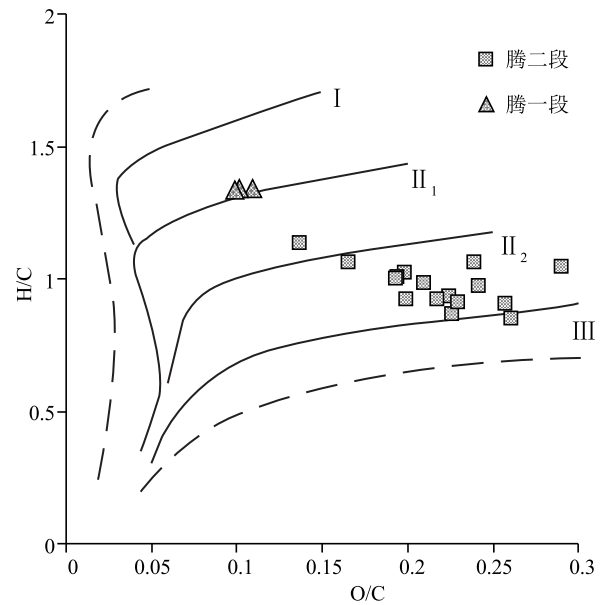
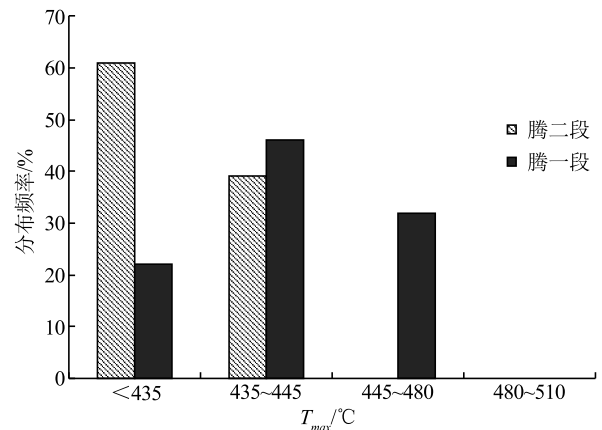
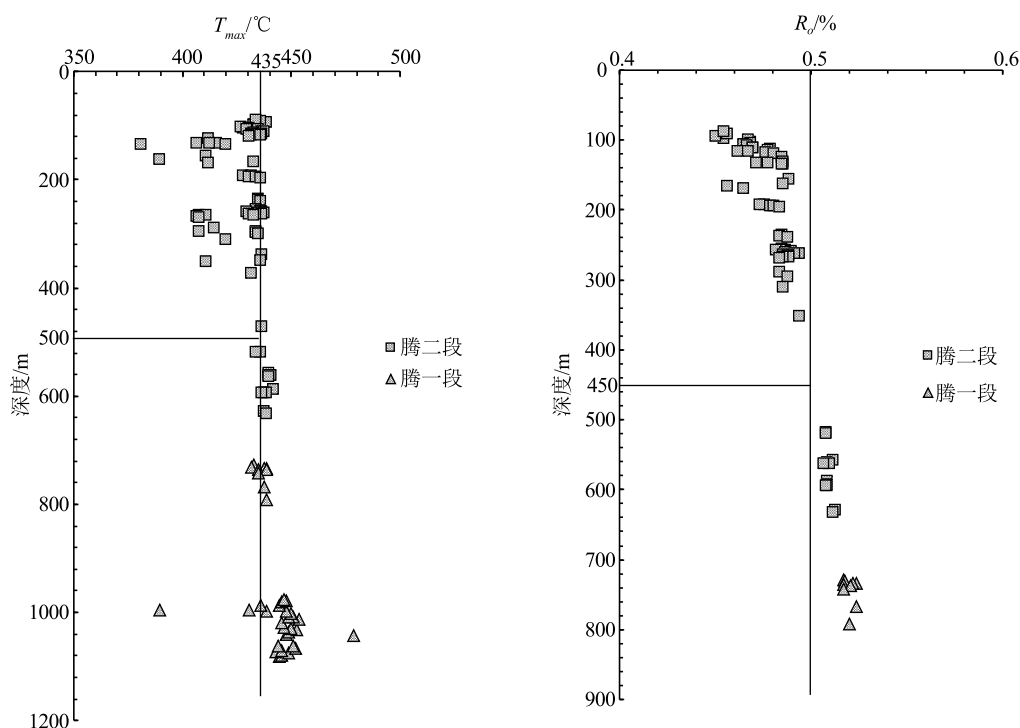


图 7 干酪根有机元素划分类型范氏图解

Fig. 7 Van's diagram of the classification types of organic elements in kerogen

图 8 腾二段与腾一段热解最高峰温 (T_{max}) 直方图Fig. 8 Histogram of T_{max} in K_1bt_1 and K_1bt_2

深度和 T_{max} 、 R_o 具有明显的线性相关性, 深度增加, T_{max} 、 R_o 增大。从两者的关系图 (图 9) 看, 现今烃源岩成熟门限在 500m 左右, 在深度约 500 m, 部分烃源岩 T_{max} 大于 435 °C, 达到低成熟演化阶段; 在深度 450 m 左右达到 $R_o=0.5\%$, 烃源岩进入低成熟演化阶段, 综合热解最高峰温 (T_{max}) 及镜质体反射率 (R_o) 数据看, 贺斯格乌拉凹陷腾二段与腾一段烃源岩大多处于未熟-低成熟阶段, 总体上 R_o 平均值在 0.49 左右, 450~500 m 深度烃源岩进入低成熟演化阶段 (图 9)。由于研究区探井取样大多在凹陷边缘, 而且整个二连盆地在赛汉塔拉期有一次重要

图 9 T_{max} 和 R_o 随深度变化关系Fig. 9 Relationships between T_{max} and R_o with depth

的剥蚀过程,剥蚀厚度不等,在贺斯格乌拉地区剥蚀厚度约为 800 m,因此在凹陷中心部位可能会形成进入生油窗范围内的烃源灶。

4 生物标志物特征信息

甾烷的 $C_{29}\alpha\alpha\alpha 20R$ 是普遍存在于活生物体中的生物构型,而 $C_{29}\alpha\alpha\alpha 20S$ 及 $C_{29}\alpha\beta\beta 20R$ 和 $20S$ 是较稳定的地质构型。随着深度增加,有机质成熟度提高,20R 构型向 20S 构型转化,使甾烷的 $20S/20(R+S)$ 值增大, $\alpha\alpha$ 构型向 $\beta\beta$ 构型转化,使 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 值增大。通常可以用 $20S/20(R+S)$ 值划分有机质热演化成熟阶段:比值低于 0.2 为未成熟阶段,0.2~0.35 为低熟阶段,0.35~0.5 为成熟阶段。 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 值随深度的增大而升高,总体仍在 0.35 以下,表明成熟度较低,仍处在低成熟阶段。

需要注意的是,在浅层 100 m 附近几个样品的甾烷异构化指数较高,已经达到低成熟-成熟阶段,明显高于地层本身的成熟度,可能代表有深层成熟度较高的油气运移浸染(图 10)。

5 贺地 1 井天然气成因

贺地 1 井在白垩系腾二段底部和腾一段顶部深

色泥岩和粉砂质泥岩之间发现气测异常层段,在 690~710 m 井段获得较好的气显示。分别对 712 m 处井口泥浆天然气样和 716 m 涌水天然气样进行了天然气组分和同位素分析(表 2)^[16]。结果显示,712 m 与 716 m 处的 2 组天然气样品组分主要为甲烷,含量分别为 100% 和 99.8%,不含乙烷以上的重烃,干燥系数为 1,表现出典型的生物成因气特征^[17];甲烷碳同位素值分别为 -70.5‰ 和 -68.2‰ ,氢同位素值分别为 -290‰ 和 -281‰ ,2 组样品的甲烷碳同位素值均符合生物成因气甲烷碳同位素值的分布范围($\delta^{13}C_{CH_4} < -55\text{‰}$)^[18]。

自然界的生物甲烷主要有 2 种形成途径,即乙酸发酵和 CO_2 还原作用,根据甲烷的碳、氢稳定同位素特征可以区分这 2 种途径, CO_2 还原作用形成的甲烷具有较重的氢同位素值和较轻的碳同位素

表 2 贺地 1 井天然气稳定碳氢同位素特征

Table 2 Characteristics of stable carbon and hydrogen isotopes of natural gas in well Hedi 1

采样地点及深度	$\delta^{13}C_{CH_4}/\text{‰}$	$\delta D_{CH_4}/\text{‰}$
贺地 1 井 712 m	-70.5	-290
贺地 1 井 716 m	-68.2	-281

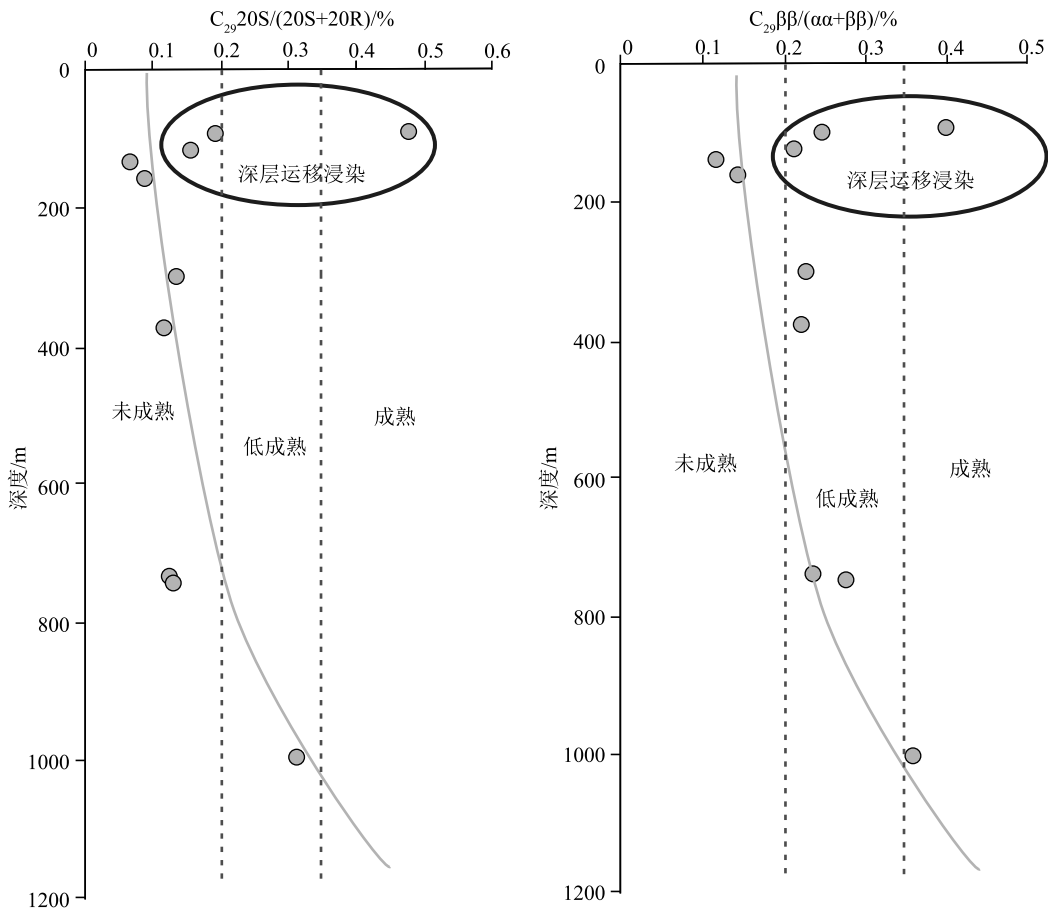


图 10 贺地 2 井烃源岩甾烷异构化参数自然演化剖面

Fig. 10 Natural evolution profile of sterane isomerization parameters in source rocks of well Hedi 2

值^[19-21]。本次所采的贺地 1 井甲烷样品落在 Whiticar^[22]提出的天然气鉴别图版的混合和过渡带范围(图 11),表明贺地 1 井天然气成因为乙酸发酵与 CO₂还原混合气。一般,海相环境以二氧化碳还原型为主,而陆相淡水-微咸水沉积环境以乙酸发酵型为主^[23],随着深度增加,二氧化碳还原所占比例提高。

生物成因气与地下沉积有机质相伴生,其生成和聚集受一系列因素的影响,如丰富的有机质、盐度、压力等。生物成因气藏埋藏浅、分布时代新,以中—新生代为主^[24]。

6 结 论

通过对本区烃源岩地球化学特征、天然气成因等研究发现,贺斯格乌拉凹陷下白垩统烃源岩发育,具备形成工业油气流的物质基础,有机质类型主要为 II₁—II₂型,部分甚

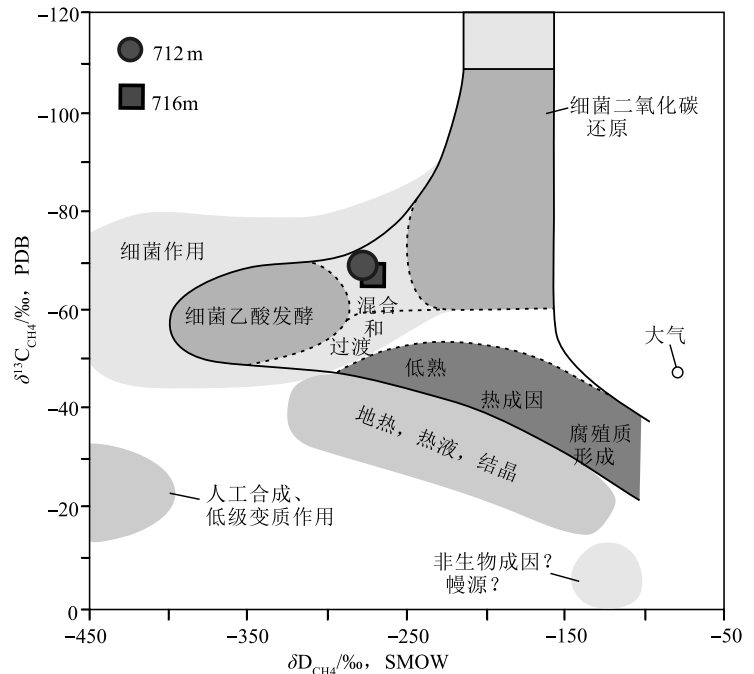


图 11 贺地 1 井天然气成因判别

Fig. 11 Identification of natural gas genesis in well Hedi 1

至达到 I 型级别,凹陷边缘烃源岩成熟度较低, R_o 平均为 0.49%,处于未熟-低熟阶段,推测向凹陷中心白垩系烃源岩可能进入生油高峰,具有一定的勘探潜力。

另外,贺地 1 井天然气以甲烷组分为主,甲烷的碳氢同位素较轻,为 CO_2 还原和乙酸发酵混合途径生成的生物气。

致谢:论文在撰写过程中得到中海油研究总院李威的指导与帮助,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 李世臻,周新桂,王丹丹,等.内蒙古突泉盆地突参 1 井原油地球化学特征与油源分析[J].地质通报,2015,34(10): 1946-1951.
- [2] 刘卫彬,李世臻,周新桂,等.大兴安岭西缘新发现具有油气远景的中生界凹陷[J].中国地质,2018,45(3): 634-635.
- [3] 陈树旺,公繁浩,杨建国,等.松辽盆地外围油气基础地质调查工程进展与未来工作方向[J].中国地质调查,2016,3(6): 1-9.
- [4] Li S Z, Liu W B, Wang D D, et al. Discovery of Hesigewula Sag on the western margin of Da Hinggan Mountains in China and its significance in petroleum geology[J]. China Geology, 2019, 2: 440-458.
- [5] 李思田,李宝芳,杨士恭,等.中国东北部晚中生代断陷型煤盆地的沉积作用和构造演化[J].地球科学,1982,(3): 275-294.
- [6] 李思田,杨士恭,吴冲龙,等.中国东北部晚中生代裂陷作用和东北亚断陷盆地系[J].中国科学(B 辑),1987,(2): 185-195.
- [7] 云金表,罗笃清,李玉喜.东北地区中生代断陷盆地群构造演化与成油关系探讨[J].石油勘探与开发,1994,(6): 40-45,115.
- [8] 周荔青,刘池阳.中国东北油气区晚侏罗世—早白垩世断陷油气成藏特征[J].中国石油勘探,2004,(2): 20-25,1-2.
- [9] 张文浩,张交东,周新桂,等.中国东北地区东部盆地油气资源前景展望[J].地质通报,2020,39(2/3): 307-318.
- [10] 田在艺,韩屏.东北地区中生代含油气盆地构造分析与形成机制[J].河北地质学院学报,1992,(5): 463-472.
- [11] 卢双舫,张敏.油气地球化学[M].北京:石油工业出版社,2008: 198-226.
- [12] 孟庆任,胡健民,袁选俊,等.中蒙边界地区晚中生代伸展盆地的结构、演化和成因[J].地质通报,2002,(Z1): 224-231.
- [13] 陈建平,赵长毅,何忠华.煤系有机质生烃潜力评价标准探讨[J].石油勘探与开发,1997,(1): 1-5,91.
- [14] 李苗苗,马素萍,夏燕青,等.泌阳凹陷核桃园组湖相烃源岩微观形态特征与形成机制[J].岩性油气藏,2014,26(3): 45-50.
- [15] 龚大兴,林金辉,唐云凤,等.上扬子地台北缘古生界海相烃源岩有机地球化学特征[J].岩性油气藏,2010,22(3): 31-37.
- [16] 郭立言,顾信章.热解技术在我国生油岩研究中的应用[J].石油学报,1986,7(2): 13-19.
- [17] 戴金星,陈英.中国生物气中烷烃组分的碳同位素特征及其鉴别标志[J].中国科学(B 辑),1993,(3): 303-310.
- [18] 陈英,戴金星.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): 209-219.
- [19] 何家雄,洗仲猷,陈伟煌,等.莺-琼盆地生物气及生物-低成熟过渡带气特征与勘探前景[J].中国海上油气(地质),2002,16(1): 27-32.
- [20] Whiticar M J, Faber E, Schoell M. Biogenic methane formation in marine and freshwater environments: CO_2 reduction vs. acetate fermentation— ^{13}C isotope evidence [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1986, 50(5): 693-709.
- [21] Schoell M. The hydrogen and carbon isotopic composition of methane from natural gases of various origins [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1980, 44(5): 649-661.
- [22] 沈平,徐永昌,王先彬,等.气源岩和天然气地球化学特征及成气机理研究[M].兰州:甘肃科学技术出版社,1991,1: 66-1.
- [23] 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,(1): 46-51.
- [24] 辛碧霄,陈一俊.生物气成因机制与勘探前景[J].当代化工,2018,47(9): 1928-1931.