

文章编号:1673-5005(2012)02-0068-08

海拉尔-塔木查格盆地中部断陷带 CO₂ 气藏中 CO₂ 成因分析

张铜磊^{1,2}, 陈践发^{1,2}, 朱德丰³, 赵兴齐^{1,2}

(1. 中国石油大学 地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;
3. 大庆油田勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163712)

摘要:以海拉尔-塔木察格盆地中部断陷带 CO₂ 气藏中的 CO₂ 为研究对象,通过组分分析、碳同位素及氦、氩同位素分析,结合研究区 CO₂ 含量和同位素数据及他人研究成果,利用排除法探讨研究区 CO₂ 的成因及来源。结果表明:研究区 CO₂ 平均含量大于 85%, CO₂ 稳定碳同位素偏轻, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 为 -13.1‰ ~ -8.8‰, 为目前已发现的具有较为特殊碳同位素组成特征的 CO₂ 气藏;尽管 CO₂ 稳定碳同位素偏轻,但通过排除法可以证明该区 CO₂ 为无机成因气的结论最为合理,且 CO₂ 应来源于上地幔岩浆脱气。

关键词:海拉尔-塔木察格盆地;中部断陷带;二氧化碳;成因;排除法

中图分类号:TE 132.1

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2012.02.011

Genetic analysis of CO₂ in CO₂ gas reservoirs of middle fault zone of Hailaer-Tamtsag Basin

ZHANG Tong-lei^{1,2}, CHEN Jian-fa^{1,2}, ZHU De-feng³, ZHAO Xing-qi^{1,2}

(1. College of Geosciences in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. Exploration and Development Research Institute, Daqing Oilfield, Daqing 163712, China)

Abstract: Based on the research of the CO₂ gas reservoir in the middle fault zone of Hailaer-Tamtsag Basin, the origin of CO₂ was researched using the exclusive method by composition analysis of carbon, helium and argon isotope, data of CO₂ amount and the research achievements of CO₂ gas by the scholars. The results show that the average content of CO₂ in the study area is more than 85%, and the value of the $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ ranges from -13.1‰ to -8.8‰. With the characteristic of light $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$, the gas reservoir is the scarce one with a special isotopic composition. Though carbon isotopic value is relatively light, the origin of CO₂ still can be identified as upper-mantle gas degassed from magma.

Key words: Hailaer-Tamtsag Basin; middle fault zone; CO₂ gas; origin; exclusive method

在海拉尔-塔木查格盆地的油气勘探中,发现了许多富含 CO₂ 的天然气气藏。盆地中 CO₂ 的成因、分布规律和成藏特征受到了油气地质工作者的极大关注^[1]。然而,研究区 CO₂ 气藏中的 CO₂ 碳同位素值普遍小于 -10‰,而 CO₂ 含量平均高达 85%,这在国内外所发现的 CO₂ 气藏中较为独特。自然界中 CO₂ 的来源有两种,即有机成因和无机成因,也要考虑混合成因。笔者利用排除法分析研究区

CO₂ 的成因及来源。

1 地质背景

海拉尔-塔木察格盆地位于内蒙古自治区呼伦贝尔盟西南部,东起伊敏河,西达呼伦湖西岸及巴彦呼舒一线,北至海拉尔河以北,南至贝尔湖并向南延伸入蒙古人民共和国境内塔姆察格盆地^[2]。地理位置处于东经 115°30' ~ 120°00',北纬 46°00' ~ 49°

收稿日期:2011-10-03

基金项目:大庆油田有限责任公司勘探开发院资助项目(2007-JS-10435)

作者简介:张铜磊(1983-),男(汉族),天津人,博士研究生,从事油气藏形成机制与分布规律研究。

40',总面积达67 670 km²,在中国境内面积为40 550 km²。盆地内部平坦,大部分被第四系覆盖,海拔在600~700 m,大体呈东高西低趋势。

海拉尔-塔木查格盆地是在内蒙-大兴安岭晚古生代基底上发育起来的中-新生代多旋回、叠合式、断陷-拗陷型盆地,其中中国境内的海拉尔盆地可划分为“三拗两隆”5个一级构造单元,进一步划分为16个凹陷、4个凸起,共20个二级构造单元,凹陷面积为25 260 km²。塔木查格盆地所发现的2个主要凹陷,即巴音博德-桑布尔凹陷和塔木查格凹陷,实际是海拉尔盆地的呼和湖凹陷和查干诺尔凹陷往蒙古国的延伸部分,因此塔木查格盆地与海拉尔盆地在形成原因、构造模式、演化历史、地层发育以及沉积岩性等方面几乎是完全相同的,其中盆地的中部断陷带为重点勘探地区(图1)。



图1 海拉尔-塔木查格盆地中部断陷带位置
Fig.1 Location of the middle fault zone in Hailaer-Tamtsag Basin

海拉尔-塔木查格盆地基底为海西-印支期花岗岩以及布达特群,盖层充填自下而上依次为下白垩统兴安岭群,扎赉诺尔群的铜钵庙组、南屯组、大磨拐河组、伊敏组,上白垩统贝尔湖群、青元岗组及古近系、新近系。海拉尔盆地沉积厚度超过6 km,塔木查格盆地总厚度为4~5 km(图2)。

南屯组和大磨拐河组为海拉尔盆地主要的烃源层,铜钵庙组和布达特群为局部烃源层。母质类型较差,主要为Ⅱ型,其次为Ⅲ型,其中南屯组Ⅰ+Ⅱ型达70%。储层主要分布在南屯组和大磨拐河组,其次为铜钵庙组。岩性主要为砂岩,次为砂砾岩及

变质岩和泥岩裂缝^①。塔木查格盆地同样具有两套主要的烃源岩,即上侏罗一下白垩统查干组页岩段湖相深灰、黑色泥岩和下白垩统下宗巴音组浅湖相灰、灰褐色泥岩、页岩^②。

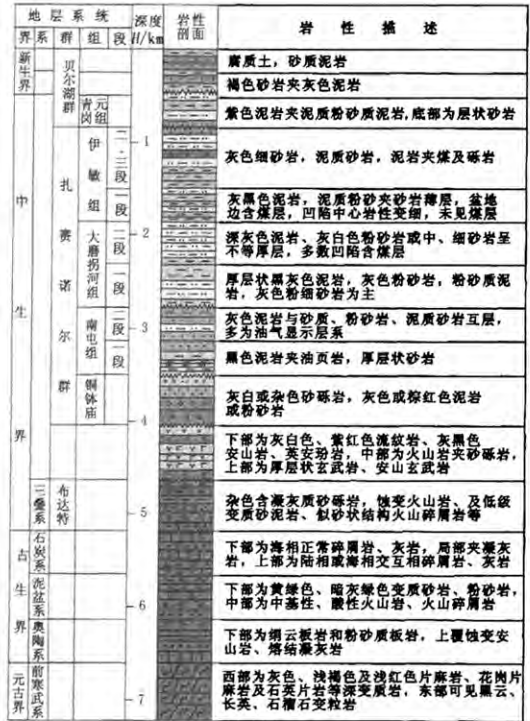


图2 海拉尔盆地地层综合柱状图(大庆研究院,2006)
Fig.2 Synthetic histogram of formations in Hailaer-Tamtsag Basin(Daqing Research Institute,2006)

海拉尔-塔木查格盆地是在古生代褶皱基底上发展而成的中新生代拉张伸展型盆地。中生代早期受华力西运动高地温场的影响,引起上地幔物质上隆产生断裂;早-中侏罗世时期受燕山运动的影响,区内断裂活动加剧,晚侏罗世-早白垩世时期,在张应力作用下,在古构造基础上形成了海拉尔盆地下部沉积盖层。在断陷孕育和早期的拉张阶段始终伴随着强烈的火山活动和岩浆沿着深大断裂带的侵入,侏罗世时期这种强烈的岩浆和断裂活动,一方面提供了CO₂通道,含有大量CO₂的岩浆沿深大断裂由深部上涌,并由于压力降低释放出CO₂。气体继续沿深大断裂向上运移至浅部的有利圈闭中聚集成藏。整个盆地到早白垩世后期应力场表现为左旋压扭,在这种应力场作用下,早期为CO₂运移通道的

① 华北石油恒业技术服务中心, 乌尔逊-贝尔凹陷构造特征与油气富集规律, 大庆油田有限责任公司勘探分公司(内部报告), 2003。

② 蒙古国塔木查格盆地勘探开发潜力与经济评价, 大庆油田有限责任公司勘探分公司(内部报告), 2004。

深大断裂以挤压为主,这种早期以张性为主,晚期具有挤压性质的断裂,在圈闭形成时,对于油气的保存无疑又起到遮挡作用,对 CO_2 的运移和聚集成藏十分有利^[3]。

2 CO_2 气藏分布

到目前在海拉尔-塔木查格盆地中部断陷带已发现3个高 CO_2 富集区,分别为苏仁诺尔断裂构造带、乌南洼槽和巴彦塔拉断裂构造带。其中苏仁诺尔断裂构造带是最富集 CO_2 的区块,先后发现了苏2、苏3等7口高含 CO_2 气井, CO_2 平均含量大于90%;乌南洼槽地区目前已发现了1口高含 CO_2 的气井,即乌208-54;巴彦塔拉断裂构造带发现了2口高含 CO_2 的气井,乌10和乌13井, CO_2 平均含量大于85%(图3)。

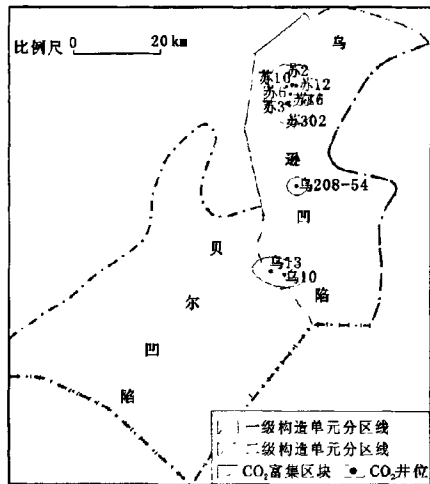


图3 海-塔盆地中部断陷带 CO_2 富集区块

Fig.3 Sketch map of blocks with high content of CO_2 in middle fault zone of Hailaer-Tamtsag Basin

3 与国内外无机成因 CO_2 气藏形成条件对比

含二氧化碳的天然气遍布全球,但高含 CO_2 的天然气主要分布在地幔隆起区、火山岩浆活动区、断裂系十分发育的地壳活动区、地热异常的碳酸盐岩分布区、油气富集区和含煤盆地中。目前,全球已发现的高含二氧化碳天然气主要分布在环太平洋国家和地区。这是由于自中-新生代以来,环太平洋地区火山、岩浆、断裂活动十分频繁,所以目前在环太

平洋的国家和地区,如日本、中国东部、南中国海、印度尼西亚、新西兰、菲律宾、越南、泰国、马来西亚、澳大利亚、墨西哥、美国和加拿大等均发现了高含 CO_2 的天然气气田(藏)群(带)。

综观无机 CO_2 气田(藏)在全球的分布情况及地质、地球化学背景,可以发现诸多可循的规律^[4]。研究区无机 CO_2 气藏的形成地质条件大多符合这些规律。

(1) CO_2 生成带与火山岩活动带有关。研究区的 CO_2 气井均分布于沿区域性深断裂展布的花岗岩分布区及其附近,这说明沿花岗岩分布带由构造运动引起的岩浆侵入或火山岩喷发是研究区无机 CO_2 的主要成气时期。著名的墨西哥坦皮哥、美国洛基山东麓、意大利西西里岛和中国的东部中-新生代陆相盆地发现的高含 CO_2 气藏区,均是岩浆活动区。已发现的 CO_2 气藏和古代火山口或巨大的岩浆侵入体距离很近。有的气藏下面就是侵入体,有的则距火山口仅几公里远。

(2) CO_2 的聚集与深大断裂带的展布关系密切。 CO_2 的分布明显地受控于区域性大断裂。断裂的作用主要是控制 CO_2 气藏成带出现和形成断层遮挡的 CO_2 气藏。研究区的所有 CO_2 气藏均直接或间接与深大断裂沟通,这表明研究区 CO_2 气藏的形成与深大断裂密切相关^[3]。亚利桑纳黑弥撒盆地的 CO_2 气田中的 CO_2 就是来源于沿北西向断层运移来的深部火山岩浆。中国东部松辽盆地^[5]、渤海湾盆地^[6]、苏北盆地^[7]、三水盆地^[8]和南海北部大陆架边缘盆地^[9]等均发现了高含 CO_2 的天然气藏,且大都为岩浆-幔源成因,这些 CO_2 气藏的聚集大都与断层或岩脉伴生,或者附近有岩浆侵入或火山活动^[9-11],表明岩浆活动和断裂分布特征是控制这些地区 CO_2 形成和聚集成藏的主要因素。

(3) 富含 CO_2 气藏往往与地热流值较大和地温梯度较高的含油气盆地有关。热流值大于 1.3 HFU,地温梯度大于 $3.5\text{ }^\circ\text{C}/(100\text{ m})$ 的高热-热构造区带是无机 CO_2 发育的有利区。如莺歌海盆地东方 1-1 气田,其二氧化碳气藏热流值很高,地温梯度达 $4.49\sim 4.79\text{ }^\circ\text{C}/(100\text{ m})$ 。海拉尔-塔木查格盆地在中新生代经历了强烈的伸展活动和多期的岩浆作用,盆地古莫霍面的形态起伏较大,基本上呈北东向和北北东向展布,在巴彦山-贝尔凹陷等莫霍

③ 陈践发,唐友军,张铜磊. 海拉尔-塔木查格盆地中部断陷带 CO_2 气成因与成藏控制因素研究. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院(内部报告), 2009.

面隆起,莫霍面隆起上伴有高低温度梯度异常(如 乌尔逊凹陷北部古地温梯度为 4.84 ℃/(100 m),南部古地温梯度为 5.12 ℃/(100 m),为无机成因 CO₂ 的发育创造了条件。

(4)富含 CO₂ 天然气聚集区与地热流值较大和地温梯度较高的碳酸盐岩分布区有关。

(5)富含 CO₂ 的天然气也往往聚集于含煤盆地。海拉尔-塔木查格盆地属于典型的中生代聚煤盆地。

(6)CO₂ 气藏主要形成于中、新生代。研究区 CO₂ 主要成藏期在燕山期-伊敏组沉积末期。

(7)CO₂ 的储集岩主要是海相灰岩,其次是砂岩。海塔盆地中部断陷带储层主要分布在南屯组,其次为铜钵庙组。岩性主要为砂岩,次为砂砾岩及变质岩和泥岩裂缝。

4 CO₂ 同位素组成特征及成因

4.1 CO₂ 同位素组成特征

海-塔盆地中部断陷带 CO₂ 气藏中各组分及

表 2 海-塔盆地 CO₂ 气藏中氦、氩同位素组成特征

Table 2 Isotopic composition of noble gas (helium, argon) in CO₂ reservoir of Hailaer-Tamtsag Basin

样品名	井深 H/km	层位	采样容器	$w(^3\text{He})/w(^4\text{He})$	R/R_a	$w(^{36}\text{Ar})/w(^{36}\text{Ar})$	$w(^{40}\text{Ar})/w(^{36}\text{Ar})$
苏 12	1.508 6 ~ 1.491 8	N1	钢瓶	$(1.76 \pm 0.05) \times 10^{-6}$	1.26	0.1907(9)	966(6)
苏 16	1.771 4 ~ 1.655 8	N2	钢瓶	$(1.68 \pm 0.05) \times 10^{-6}$	1.20	0.1900(9)	916(5)
苏 6	2.010 0 ~ 2.024 0	N1	钢瓶	2.08×10^{-6}	1.49	$0.183 7 \times 10^{-6}$	289.6(5)

注: R/R_a 为样品氦与大气氦的同位素之比。

4.2 CO₂ 成因探讨

CO₂ 碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 是一种鉴别有机成因和无机成因 CO₂ 的有效方法^[12-19];有机成因的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值小于-10‰,主要分布于-30‰~-10‰;无机成因的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值大于-8‰,主要分布于-8‰~3‰。无机成因 CO₂ 中,由碳酸盐岩热变质形成的 CO₂ 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 接近于碳酸岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,为-3‰~3‰;火山-岩浆成因和幔源 CO₂ 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值大多为-8‰~-4‰^[20]。

不同成因类型的 CO₂ 的含量及其碳同位素组合特征有明显差异,据此可区分有机成因和无机成因 CO₂。宋岩根据国内外已知的不同成因 CO₂ 的碳同位素组成及其对应的天然气中的 CO₂ 组分含量绘制的双因素图,可以很好地区分无机成因和有机成因的 CO₂^[21]。戴金星根据中国 212 个不同成因的 CO₂ 的含量,并利用澳大利亚、泰国、新西兰、菲律宾、加拿大、日本和原苏联 100 多个不同成因 CO₂ 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 与对应的 CO₂ 含量资料编绘了 CO₂ 成因鉴别图版^[20]。从整体上看,当 CO₂ 含量小于 15%,

碳、氢同位素组成特征见表 1,稀有气体氦、氩同位素组成特征见表 2。

海-塔盆地中部断陷带 CO₂ 气藏中 CO₂ 碳同位素值大多小于-10‰,CH₄ 碳同位素值均小于-30‰,C₂H₆ 碳同位素值均小于-28‰。CO₂ 气藏中稀有气体氦同位素值一般为大气氦的 1~1.5 倍。

表 1 海-塔盆地 CO₂ 气藏中 CO₂ 及烃类气碳同位素组成特征

Table 1 Carbon isotope characteristic of CO₂ and hydrocarbon gas in CO₂ reservoir of Hailaer-Tamtsag Basin

井位	$\mu(\text{CO}_2)/\%$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}/\text{‰}$	$\delta^{13}\text{C}_1/\text{‰}$	$\delta^{13}\text{C}_2/\text{‰}$	$\delta^{13}\text{C}_i/\text{‰}$
苏 2	97.6	-11.4	-47.7	-41.2	-31.6
苏 6	98.8	-10.2	-47.9	—	—
苏 8	92.25	-13.1	—	—	—
乌 10	94.51	-11.4	-49.3	-37.6	—
乌 13	76.08	-8.8	-46.4	-39.8	—
乌 208-54	92.66	-12.2	-45.3	-30.0	-29.7
	91.32	-12.7	-48.2	-35.9	-32.1

$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} < -10\text{‰}$ 时是有机成因二氧化碳;当 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} \geq -8\text{‰}$ 都是无机成因二氧化碳;当 CO₂ 含量大于 60% 时,其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值都高于-8‰,均属于无机成因二氧化碳。

自然界中的大气氦的 $w(^3\text{He})/w(^4\text{He})$ 为 1.40×10^{-6} ^[22];幔源氦 $w(^3\text{He})/w(^4\text{He})$ 为 $(1.1 \sim 2.0) \times 10^{-5}$,通常取 1.1×10^{-5} 作为表征值。典型壳源的 $w(^3\text{He})/w(^4\text{He})$ 平均值是 $(2 \sim 3) \times 10^{-8}$ ^[23]。大气氩的 $w(^{40}\text{Ar})/w(^{36}\text{Ar})$ 为 295.5,上地幔的 $w(^{40}\text{Ar})/w(^{36}\text{Ar})$ 值分布范围很广,从接近大气氩值的 295.5 到高达 10^4 ;下地幔的 $w(^{40}\text{Ar})/w(^{36}\text{Ar})$ 则远低于上地幔。

以上为判断 CO₂ 成因最有效的几种方法,然而利用这些方法判识研究区的 CO₂ 的成因时,却无法得出合理的结论;研究区 CO₂ 碳同位素普遍小于-10‰,CO₂ 含量普遍大于 85%;仅以碳同位素可以判定研究区 CO₂ 为有机成因,若以 CO₂ 含量及 CO₂ 伴生稀有气体 He 和 Ar 同位素特征判定,研究

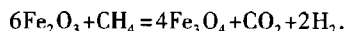
区 CO_2 则为无机成因。

鉴于此,笔者尝试利用排除法来分析研究区的 CO_2 成因。

4.2.1 假定研究区 CO_2 为有机成因

有机成因 CO_2 是指沉积有机质(腐泥型和腐殖型)在成岩作用和深成热解作用以及烃类氧化作用过程中生成的 CO_2 。通常有机成因的 CO_2 包括:①有机质被氧化产生的 CO_2 ;②有机质裂解生成的 CO_2 ;③有机质热降解生成的 CO_2 ;④有机质微生物降解作用生成的 CO_2 。

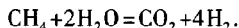
(1)有机物被氧化产生的 CO_2 。有机质在地下被矿物化溶液作用往往可生成 CO_2 。Farmer^[24]认为,地下含烃沉积层如与矿化水接触,则烃被氧化生成 CO_2 。Barke 等^[25]认为地下矿化水中的赤铁矿(Fe_2O_3)可与烃类(CH_4)作用生成 CO_2 ,其反应方程为



他们通过热力学计算发现,随着地层埋深增加,赤铁矿和黄铁矿以及甲烷含量减少,而磁铁矿和二氧化碳含量增大。

由于这类成因的 CO_2 主要是由地壳表层沉积有机质氧化形成的,故其 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-20\text{‰} \sim -10\text{‰}$,其所含氦的 $w(^3\text{He})/w(^4\text{He})$ 一般为 $10^{-8} \sim 10^{-6}$ 。

(2)有机质裂解生成的 CO_2 。Cooles 等^[26]实验研究发现,在 $250 \sim 360\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下,烃源岩加水裂解可产生大量的 CO_2 ,其反应方程为



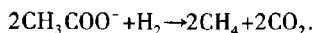
事实上,这一反应中间过程经过了许多复杂的化学作用^[26]。Barker 等^[25]也进行过类似的热力学计算,认为超深砂岩储层($3.048 \sim 12.192\text{ km}$)天然气组分中 CO_2 占有很重要的比重。

由于这类成因的 CO_2 是有机质在深部高温条件下裂解生成的,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值一般为 $-15\text{‰} \sim -9\text{‰}$,氦的 $w(^3\text{He})/w(^4\text{He})$ 一般为 10^{-8} 数量级。

(3)有机质热降解生成的 CO_2 。有机质特别是腐殖煤类,含氧官能团丰富, CO_2 的产率相当高。据计算^[27],从褐煤到无烟煤的整个热演化作用过程中,1 kg 煤能生成 751 L 的 CO_2 。因此,有机质特别是腐殖型干酪根的热降解作用,常常是 CO_2 的重要来源。

另外,有机质在热降解过程中能产生大的挥发性脂肪酸根离子,而这些酸根离子在热力作用下可

通过加氢而生成 CO_2 :



由于这种成因的 CO_2 是有机质在较低温度条件下($70 \sim 150\text{ }^\circ\text{C}$)发生的热降解产物之一,且发生在典型的沉积壳层中,故 $\delta^{13}\text{C}$ 值较小,一般为 $-25\text{‰} \sim -15\text{‰}$;氦的 $w(^3\text{He})/w(^4\text{He})$ 为 10^{-8} 数量级。

(4)有机质经微生物降解作用生成的 CO_2 。在低温($<70\text{ }^\circ\text{C}$)条件下,微生物对有机质的降解作用也可生成部分 CO_2 。Pankina 等^[28]认为由这种作用生成的 CO_2 在油气藏 CO_2 中占有相当的比例,这类成因 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较小,一般小于 -20‰ ,氦的 $w(^3\text{He})/w(^4\text{He})$ 为 10^{-8} 数量级。

研究区主力烃源岩为大磨拐河组 and 南屯组,海拉尔盆地大磨拐河组热演化程度具有南高北低的特点,海拉尔盆地北部绝大部分地区大磨拐河组烃源岩处于未成熟阶段,海拉尔盆地南部大磨拐河组烃源岩普遍进入低成熟生油阶段,在乌尔逊凹陷西部凹陷中心部位大磨拐河组热演化程度最高,大磨拐河组烃源岩进入低成熟-成熟生油阶段。南屯组热演化程度同样具有南高北低的特点,盆地北部绝大部分地区南屯组的 R_o 小于 0.7,地层温度小于 $80\text{ }^\circ\text{C}$,表明海拉尔盆地北部绝大部分地区南屯组烃源岩处于低成熟-成熟生油阶段。海拉尔盆地南部凹陷南屯组的 R_o 值及地层温度普遍较高, R_o 值普遍可达 0.7,最高可达 1.3,地层温度可达 $70 \sim 90\text{ }^\circ\text{C}$,说明海拉尔盆地南部凹陷南屯组烃源岩普遍处于成熟生油阶段,局部已处于高成熟生油阶段^[9]。研究区烃类气中的甲烷同位素值均小于 -30‰ ,乙烷同位素值大多小于 -28‰ ,说明研究区的烃类气为典型的油型气(据表 2)。以上研究资料表明,如果研究区的 CO_2 为有机来源,那只能是有有机质热降解成因。然而,目前国内外均未发现含量较高的有机成因 CO_2 ,主要是由于 CO_2 极易溶于水,低温条件下生成的有机成因的 CO_2 大量溶于水中、被水带走而散失或因成岩作用而消耗掉,因而在天然气中虽然普遍含有 CO_2 ,但其含量一般很低, CO_2 的含量一般小于 20% ^[3]。

程有义^[29]指出,有机成因的 CO_2 在含油气盆地很普遍,但是一般不能成为含油气盆地 CO_2 气藏的有效气源。Hunt^[30]提到有机成因 CO_2 是指沉积有机质(腐泥型和腐殖型)在成岩作用和深成热解作用以及烃类氧化作用过程中生成的 CO_2 。但是,除

④ 任战利,蒲仁海. 海拉尔盆地油气富集规律及有利区带预测研究. 大庆油田有限责任公司勘探分公司(内部报告),2003.

⑤ 宋岩,柳少波. 松辽盆地含 CO_2 天然气成藏机制与分布规律研究. 大庆油田有限责任公司勘探分公司(内部报告),2008.

在热演化初期及腐殖型有机质在深成热解作用阶段前后产生较多的 CO₂ 外,有机成因 CO₂ 多是以低含量形式伴随有机烷烃气的生成而产生的。戴金星等^[31]对中国 1 266 个天然气样品的研究表明,有 1 198 个样品中含有不等量的 CO₂,其中含量低于 2% 的样品占 68%,绝大部分样品的 CO₂ 含量低于

12%,这些 CO₂ 主要是有机成因的,它们难以形成工业聚集。

通过以上学者对国内外 CO₂ 的研究分析,结合研究区 CO₂ 含量和伴生稀有气体 He 和 Ar 同位素特征,可以断定研究区 CO₂ 为有机成因来源的假设是不成立的(表 3)。

表 3 研究区 CO₂ 气与典型有机、无机成因 CO₂ 气判识指标对比

Table 3 Identification criterions of CO₂ in researching region comparing with typical organic CO₂ and inorganic CO₂

CO ₂ 成因来源		判别指标			
		$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$w(^3\text{He})/w(^4\text{He})$	R/R_s	$w(\text{CO}_2)/w(^3\text{He})$
研究区的 CO ₂ 气		大多数小于 10	$(1.81 \sim 1.84) \times 10^{-6}$	>1	
典型 无机源	上地幔	-8 ~ -4	$>1.3 \times 10^{-5}$	>2	$10^9 \sim 10^{10}$
	地壳或地幔楔形体熔融脱气	-10 ~ -4	$10^{-7} \sim 10^{-6}$ 数量级	1 ~ 2	
	岩石变质	-15 ~ 9	$10^{-8} \sim 10^{-7}$ 数量级		
	碳酸盐岩热分解	-4 ~ 4	10^{-8} 数量级		
典型 有机源	有机质微生物降解	<-20	10^{-8} 数量级	<1	$10^5 \sim 10^{13}$ (多大于 10^{10})
	有机质被氧化	-20 ~ -10	$10^{-8} \sim 10^{-6}$ 数量级		
	有机质被降解	-25 ~ -15	10^{-8} 数量级		
	有机质热裂解	-15 ~ -9	10^{-8} 数量级		
	大气源	-10 ~ -7	$1.3 \times 10^{-6} \sim 1.4 \times 10^{-6}$	1	

4.2.2 假定研究区 CO₂ 为无机成因

无机成因又可分为地幔-岩浆成因和岩石化学成因。其中地幔-岩浆成因 CO₂ 又可进一步分为上地幔岩浆脱气和中下地壳或消减带上地幔楔形体中的岩石熔融脱气。岩石化学成因包括碳酸盐岩热分解成因和岩石中的碳酸盐岩矿物的热分解成因。

戴金星等^[32]指出,岩浆-火山成因的 CO₂ 和地幔成因的 CO₂ 在天然气中含量往往很高。幔源岩浆中富含 H₂O、CO₂ 等挥发组分,已为地球表层各种方式的脱气作用和幔源岩浆包体中赋存的大量含 CO₂ 的流体包裹体所证实,如科拉帕克活火山在喷发期每年释放出 10^9 m^3 的 CO₂,中国东部中生代伸展盆地带以及现代构造岩浆活动区,如五大连池、广东平远及云南腾冲等,均有幔源-岩浆成因 CO₂ 产出^[20]。程有义^[29]认为只有未脱气地幔岩浆作用提供的 CO₂ 气源才具有形成高纯 CO₂ 气藏的可能性。唐忠驭^[33]指出,已知的巨大的天然 CO₂ 气田中的 CO₂ 主要来源于岩浆活动及碳酸盐岩热分解。朱岳年^[4]指出,天然气中高浓度 CO₂ 往往是无机成因的,且通常产在火山岩浆岩发育地区,地热异常高的碳酸盐岩分布区及有热水伴生的以钙质胶结为主的砂岩分布区、煤田区及油气聚集区。

区域地质资料表明研究区前兴安岭群发育碳酸盐岩,由碳酸盐岩分解生成 CO₂ 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值一般分布在 -3.7‰ ~ 3.7‰,而研究区 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值位于 -8.2‰ ~ -13.1‰,相差甚大,因此可以排除研究区

CO₂ 来自于碳酸盐岩分解的可能性。

综合其他学者对 CO₂ 的研究成果和研究区 CO₂ 气藏中 CO₂ 的含量及伴生稀有气体同位素的组成特征,可以判定:研究区 CO₂ 若为无机成因,则应来源于上地幔岩浆脱气,唯有 CO₂ 碳同位素值不符合无机气的标准。因此暂认为研究区 CO₂ 来源为无机成因(表 3)。

4.2.3 假定研究区 CO₂ 为有机无机 CO₂ 混合成因

研究区 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值分布于 -8.2‰ ~ -13.1‰,若该 CO₂ 碳同位素值为有机 CO₂ 和无机 CO₂ 混合的结果,那研究区的 CO₂ 理论上就应该存在 2 种混合模式:① 有机成因 CO₂ 与变质成因 CO₂ 混合模式;② 有机成因 CO₂ 与幔源-岩浆成因 CO₂ 混合模式。

变质成因 CO₂ 来自碳酸盐岩和碳酸盐矿物的动力变质、接触变质和区域变质作用。接触变质源于岩浆岩对围岩的热作用。中国东部伸展盆地中主要发育基性及中基性岩,它们或以火山岩形式喷出地表,热能急速释入大气,或沿断裂带形成岩墙及岩席等,所能产生的接触变质作用一般很弱且影响范围小。动力变质作用主要发育于压性及压扭性构造带,多与韧性剪切作用有关,而张性构造区动力变质作用弱。中国东部伸展盆地虽存在走滑作用,产生局部的压应力效应,但总的构造背景是张性,难以形成大量的动力变质成因 CO₂。区域变质作用多发育于挤压造山带,显然,以伸展作用为主的中国东部在中、新生代不具备区域变质作用条件^[34]。Irwin 和

Barnes^[35]对全球 CO₂ 分布特点与构造活动性关系的研究表明,变质成因 CO₂ 多发育于挤压构造背景,张性构造区则主要形成幔源-岩浆成因 CO₂, 中国 2 类 CO₂ 的分布与此一致。

海拉尔-塔木查格盆地属于典型的伸展型盆地,因此既不具备形成大量变质成因 CO₂ 的条件,更不具备这类 CO₂ 大规模聚集成藏的条件。

因此可以判定,研究区 CO₂ 若为有机无机 CO₂ 混合成因,那只能是有机成因 CO₂ 与幔源-岩浆成因 CO₂ 混合的结果。

应用混合模式进行碳同位素计算,关键在于选取合理的有机成因的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值和无机成因的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值进行模拟计算。

前面已经提到,研究区有机 CO₂ 应主要来源于有机物热降解作用,无机 CO₂ 应源于上地幔岩浆脱气作用。依据表 3,选取研究区有机 CO₂ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -18‰(有机质热解成因 CO₂ 的平均值),无机成因 CO₂ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -6‰(平均值)。依据表 1,选取研究区混合后的 CO₂ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -11‰(平均值)。根据 Peters 等(2004)两个端元混合的同位素值计算公式:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} = \delta^{13}\text{C}_A x + \delta^{13}\text{C}_B (1-x).$$

式中, x 为整个 CO₂ 中有机成因 CO₂ 所占的比例, $1-x$ 即为无机成因 CO₂ 所占的比例; $\delta^{13}\text{C}_A$ 为有机成因 CO₂ 的碳同位素值, $\delta^{13}\text{C}_B$ 为火山-幔源成因 CO₂ 的碳同位素值; $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 为混合后 CO₂ 的碳同位素值。

将数据代入公式,计算得出 $x = 36\%$, 这表示研究区 CO₂ 气藏若为有机、无机 CO₂ 混合来源,其中有机成因的 CO₂ 要达到气藏中 CO₂ 总体积的 36%, 才能使气藏的二氧化碳碳同位素值达到现在的实测值。而前面已经提到,国内外尚未发现含量较高的有机成因 CO₂ 气藏。因此研究区 CO₂ 有机、无机混合成因的假设也是不成立的。

通过以上讨论,可以判定研究区 CO₂ 为无机成因,源于地幔岩浆脱气作用。而 CO₂ 碳同位素值普遍偏低的原因,很可能是母源(地幔和岩浆)本身碳同位素值偏低的缘故。

5 结 论

(1) 海拉尔-塔木查格盆地中部断陷带发现多个 CO₂ 气藏, CO₂ 平均含量高达 85%, 而 CO₂ 碳同位素值普遍小于 -10‰, 这是目前国内外所发现的 CO₂ 气藏中独特的一例。

(2) 研究区 CO₂ 为无机成因,来源于上地幔岩

浆脱气作用。至于 CO₂ 具有较低的碳同位素值,可能是产气母源(地幔和岩浆)本身碳同位素值偏低的缘故。

参考文献:

- [1] 李美俊, 王铁冠, 卢鸿, 等. 北部湾盆地福山凹陷 CO₂ 气成因探讨[J]. 天然气工业, 2006, 26(9): 25-28.
LI Mei-jun, WANG Tie-guan, LU Hong, et al. Origin of CO₂ gas in Fushan depression in Beibu Gulf Basin[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(9): 25-28.
- [2] 张长俊, 龙水文. 海拉尔盆地沉积相特征与油气分布[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
- [3] 王平在, 李明生, 王江. 海拉尔盆地乌尔逊含氮二氧化碳气藏石油地质特征及勘探前景[J]. 特种油气藏, 2003, 10(6): 9-12.
WANG Ping-zai, LI Ming-sheng, WANG Jiang. Petroleum geology and exploration potential of Wuerxun helium-bearing CO₂ gas reservoir in Hailaer Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2003, 10(6): 9-12.
- [4] 朱岳年. 二氧化碳地质研究的意义及全球高含二氧化碳天然气的分布特点[J]. 地球科学进展, 1997, 12(1): 27-32.
ZHU Yue-nian. Significance of studying CO₂ geology and the global distributive features of high CO₂-bearing gas[J]. Advance in Earth Sciences, 1997, 12(1): 27-32.
- [5] 付晓飞, 宋岩. 松辽盆地无机成因气及气源模式[J]. 石油学报, 2005, 26(4): 23-28.
FU Xiao-fei, SONG Yan. Inorganic gas and its resource in Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(4): 23-28.
- [6] 邱隆伟, 王兴谋. 济阳拗陷断裂活动和 CO₂ 气藏的关系研究[J]. 地质科学, 2006, 41(3): 430-440.
QIU Long-wei, WANG Xing-mou. A study on relationship between fault activity and CO₂ pools in the Jiyang depression[J]. Chinese Journal of Geology, 2006, 41(3): 430-440.
- [7] 王开杨. 江苏黄桥二氧化碳气田及其成藏模式[J]. 海洋地质动态, 2006, 22(4): 17-20.
WANG Kai-yang. Huangqiao CO₂ gas field in Jiangsu province and the pooling model[J]. Marine Geology Letters, 2006, 22(4): 17-20.
- [8] 杨长清, 姚俊祥. 三水盆地二氧化碳气成藏模式[J]. 天然气工业, 2004, 24(2): 36-40.
YANG Chang-qing, YAO Jun-xiang. Modes of CO₂ gas reservoir formation in Sanshui Basin[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(2): 36-40.
- [9] 何家雄, 夏斌, 阎贫, 等. 莺-琼盆地多源非生物 CO₂ 运聚成藏特征[J]. 天然气工业, 2007, 27(4): 10-15.

- HE Jia-xiong, XIA Bin, YAN Pin, et al. Migration and accumulation of abiogenic CO₂ from multiple sources in the Yinggehai-Qiongdongnan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(4): 10-15.
- [10] 李先奇,戴金星. 中国东部二氧化碳气田(气藏)的地化特征及成因分析[J]. *石油实验地质*, 1997, 19(3): 215-221.
- LI Xian-qi, DAI Jin-xing. Geochemical characteristics and genetic analysis of CO₂ fields (pools) in east China [J]. *Experimental Petroleum Geology*, 1997, 19(3): 215-221.
- [11] 戴金星, 秦胜飞, 陶士振, 等. 中国天然气工业发展趋势和天然气地质理论重要进展[J]. *天然气地球科学*, 2005, 16(2): 127-142.
- DAI Jin-xing, QIN Sheng-fei, TAO Shi-zhen, et al. Developing trends of natural gas industry and the significant progress on natural gas geological theories in China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2005, 16(2): 127-142.
- [12] 沈平, 徐永昌. 中国陆相成因天然气同位素组成特征[J]. *地球化学*, 1991(2): 144-152.
- SHEN Ping, XU Yong-chang. The isotopic composition of natural gases from continental sediments in china [J]. *Geochimica*, 1991(2): 144-152.
- [13] 上官志冠, 高松升. 滇西地区二氧化碳的释放与地震[J]. *地震学报*, 1990, 12(2): 186-193.
- SHANGGUAN Zhi-guan, GAO Song-sheng. The CO₂ discharges and earthquakes in western Yunnan [J]. *Seismology and Geology*, 1990, 12(2): 186-193.
- [14] 戴金星, 文亨范, 宋岩. 五大连池地幔成因的天然气[J]. *石油实验地质*, 1992, 14(2): 200-203.
- DAI Jin-xing, WEN Heng-fan, SONG Yan. Natural gas of the mantle origin in Wudalianchi [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 1992, 14(2): 200-203.
- [15] 戴金星, 桂明义, 黄白林, 等. 楚雄盆地中东部禄丰-楚雄一带的二氧化碳气及其成因[J]. *地球化学*, 1986(1): 42-49.
- DAI Jin-xing, GUI Ming-yi, HUANG Zi-lin, et al. Carbon dioxide seepages and their origin in mid-east Chuxiong Basin [J]. *Geochimica*, 1986(1): 42-49.
- [16] 戴金星. 云南省腾冲县硫磺塘天然气的碳同位素组成特征和成因[J]. *科学通报*, 1988(15): 1168-1170.
- DAI Jin-xing. Carbon isotopic characteristics and origin of natural gases from the Liuhuangtang in Yunnan Province, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1988(15): 1168-1170.
- [17] WAKITA H, SANO Y, URABE A, et al. Origin of methane-rich natural gas in Japan; formation of gas fields due to large-scale submarine volcanism [J]. *Applied Geochemistry*, 1990, 5(3): 263-278.
- [18] MOORE J G, JOHN N B, CUNNINGHAM C G. CO₂-filled vesicles in mid-ocean basalt [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1977, 2(4): 309-327.
- [19] GOULD K W, SMITH J W. The genesis and isotopic composition of carbonates associated with some Permian Australian coals [J]. *Chemical Geology*, 1979, 24(1/2): 137-150.
- [20] 戴金星. 中国含油气盆地的无机成因气及其气藏[J]. *天然气工业*, 1995, 15(3): 22-27.
- DAI Jin-xing. Abiogenic gas in oil-gas bearing basins in china and its reservoirs [J]. *Natural Gas Industry*, 1995, 15(3): 22-27.
- [21] 宋岩. 松辽盆地万金塔气藏天然气成因[J]. *天然气工业*, 1991, 11(1): 17-21.
- SONG Yan. Origin of the natural gas in Wanjinta reservoir in Songliao Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 1991, 11(1): 17-21.
- [22] LUPTON J E, KLINKHAMMER G P, NORMARK W R, et al. Helium-3 and manganese at the 21th East Pacific rise hydrothermal site [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1980, 50(1): 115-127.
- [23] POREDA R J, JENDENB P D, KAPLANB I R, et al. Mantle helium in Sacramento Basin natural gas wells [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1986, 50(12): 2847-2853.
- [24] FARMER R E. Genesis of subsurface carbon dioxide [J]. *AAPG Special Volumes*, 1965, M4: 378-385.
- [25] BARKER C, TAKACH N E. Prediction of natural gas composition in ultra-deep reservoirs [J]. *AAPG Bulletin*, 1992, 76(12): 1859-1873.
- [26] COOLES G P, MACKENZIE A S. Non-hydrocarbons of significance in petroleum exploration; volatile fatty acids and non-hydrocarbon gases [J]. *Mineralogical Magazine*, 1987, 51: 483-493.
- [27] 陈荣书. 天然气地质学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989.
- [28] PANKINA R G. Origin of CO₂ in petroleum gases from the isotopic composition of carbon [J]. *International Geology*, 1978, 21(5): 535-539.
- [29] 程有义. 含油气盆地二氧化碳成因研究[J]. *地球科学进展*, 2000, 15(6): 684-687.
- CHENG You-yi. Origins of carbon dioxide in petroliferous basins [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2000, 15(6): 684-687.

(下转第80页)

- 2003,68(2):733-744.
- [4] HERRMANN F J, WANG D, HENNENFENT G, et al. Curvelet-based seismic data processing: a multiscale and nonlinear approach [J]. *Geophysics*, 2008, 73(1): A1-A5.
- [5] MÜLLER T. The common reflection surface stack method: seismic imaging without explicit knowledge of the velocity model [D]. Karlsruhe: Geophysical Institute, University of Karlsruhe, 1999.
- [6] MANN J. Extensions and applications of the common-reflection-surface stack method [D]. Karlsruhe: Geophysical Institute, University of Karlsruhe, 2002.
- [7] 譚未一, 杨长春, 李瑞忠, 等. 共反射面元叠加的实现途径及流程[J]. *地球物理学进展*, 2004, 19(2): 325-330.
- TAN Wei-yi, YANG Chang-chun, LI Rui-zhong, et al. Common reflection surface stack algorithm and processing flow [J]. *Progress in Geophysics*, 2004, 19(2): 325-330.
- [8] SUN X D, LI Z C, TENG H H. Common reflection surface stack using dip decomposition for rugged surface topography [J]. *Applied Geophysics*, 2007, 4(1): 45-50.
- [9] 吴小羊, 刘天佑, 魏伟, 等. 二维菲涅耳带共反射面元叠加方法研究[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(6): 1892-1898.
- WU Xiao-yang, LIU Tian-you, WEI Wei, et al. Two dimensional common reflection surface stack based on the Fresnel zone [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(6): 1892-1898.
- [10] BAYKULOV M, GAJEWSKI D. Seismic data enhancement with Common Reflection Surface (CRS) stack method [C/OL]. SEG 81th Annual Meeting, Las Vegas, Nevada, November 9-14, 2008; SEG Expanded Abstracts 27, 2596-2600 [2009-12-01]. <http://dx.doi.org/10.1190/1.3063882>.
- [11] BAYKULOV M, GAJEWSKI D. Prestack seismic data enhancement with partial common-reflection-surface (CRS) stack [J]. *Geophysics*, 2009, 74(3): V49-V58.
- [12] ZHANG Y, BERGLER S, HUBRAL P. Common-reflection-surface (CRS) stack for common offset [J]. *Geophysical Prospecting*, 2001, 49(6): 709-718.
- [13] BERGLER S. The common-reflection-surface stack for common offset theory and application [D]. Karlsruhe: Geophysical Institute, University of Karlsruhe, 2001.
- [14] STEHT M. Imaging walkaway VSP data using the common-reflection-surface stack [J]. *The Leading Edge*, 2007, 26(6): 764-768.
- [15] 李栋, 李振春, 孙小东, 等. 共偏移距共反射面元叠加方法[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2011, 35(3): 42-46.
- LI Dong, LI Zhen-chun, SUN Xiao-dong, et al. Common-offset common-reflection-surface stack method [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2011, 35(3): 42-46.
- [16] 杨 锴, 许士勇, 王华忠, 等. 倾角分解共反射面元叠加方法[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(5): 1148-1155.
- YANG Kai, XU Shi-yong, WANG Hua-zhong, et al. A method of dip decomposition common reflection surface stack [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(5): 1148-1155.

(编辑 修荣荣)

(上接第75页)

- [30] HUNT J M. *Petroleum geochemistry and geology* [M]. San Francisco: W H Freeman and Company, 1979: 162-164.
- [31] DAI Jin-xing, SONG Yan, DAI Chun-sen. Geochemistry and accumulation of carbon dioxide gases in China [J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1996, 80(10): 1615-1626.
- [32] 戴金星, 戴春森, 宋岩, 等. 中国东部无机成因的二氧化碳气藏及其特征[J]. *中国海上油气地质*, 1994, 8(4): 215-222.
- DAI Jin-xing, DAI Chun-sen, SONG Yan, et al. Inorganic genetic carbon dioxide gas accumulations and their characteristics in east part of china [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 1994, 8(4): 215-222.
- [33] 唐忠取. 天然二氧化碳气藏的地质特征及其利用[J]. *天然气工业*, 1983, 8(3): 22-26.
- TANG Zhong-yu. Geologic characteristics of natural carbon dioxide gas pool and its utilization [J]. *Natural Gas Industry*, 1983, 8(3): 22-26.
- [34] 戴春森, 宋岩, 戴金星. 中国两类无机成因 CO₂ 组合、脱气模型及构造专属性[J]. *石油勘探与开发*, 1996, 23(2): 1-5.
- DAI Chun-sen, SONG Yan, DAI Jin-xing. Multi-stage degassing of the earth in extensional basins of eastern China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1996, 23(2): 1-5.
- [35] IRWIN W, BARNES I. Tectonic relation of carbon dioxide discharges and earthquake [J]. *Geophy Res*, 1980, 85: 3115-3121.

(编辑 刘为清)