

柴达木盆地北缘天然气地球化学特征及其石油地质意义

田继先¹,李 剑¹,曾 旭¹,郭泽清¹,周 飞²,王 波²,王 科²

(1. 中国石油 勘探开发研究院 廊坊分院,河北 廊坊 065007;

2. 中国石油 青海油田公司 勘探开发研究院,甘肃 敦煌 736200)

摘要:为了明确柴达木盆地北缘地区天然气的成因和天然气分布规律,综合利用天然气组份及碳同位素等手段对天然气地球化学特征进行了分析。研究表明,柴北缘天然气以甲烷为主,重烃含量相对较高,不同构造带天然气组分具有明显的差异性。碳同位素分析表明, $\delta^{13}\text{C}_1$ 和 $\delta^{13}\text{C}_2$ 值分别介于 -36.4‰ ~ -19.3‰ 和 -27.4‰ ~ -19.82‰ 。天然气成因鉴别表明,该区天然气主体为煤型气,来自侏罗系烃源岩。柴北缘碳同位素分布主体为正序列特征,受不同成熟度、不同类型源岩混合以及过成熟阶段源岩等因素影响,部分地区存在天然气碳同位素倒转现象。柴北缘天然气平面分布具有分带性,烃源岩成熟度控制了油气分布,天然气位于成熟-高成熟区及附近。冷湖六号-冷湖七号、鄂博梁-葫芦山构造带以及阿尔金山前是下一步天然气勘探的重点领域。

关键词:天然气成因;碳同位素;烃源岩;油气分布;柴达木盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Geochemical characteristics and petroleum geologic significance of natural gas in the north margin of the Qaidam Basin

Tian Jixian¹, Li Jian¹, Zeng Xu¹, Guo Zeqing¹, Zhou Fei², Wang Bo², Wang Ke²

(1. Langfang Branch of Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Langfang, Hebei 065007, China;

2. Exploration and Development Research Institute, Qinghai Oilfield Company, PetroChina, Dunhuang, Gansu 736200, China;)

Abstract: In order to understand the generation and distribution of natural gas in the northern margin of the Qaidam Basin, the geochemical characteristics of natural gas are analysed with both natural gas composition and carbon isotope. The results show that the natural gas is dominated by methane, but the content of heavy hydrocarbons is relatively high. There are obvious differences in natural gas composition in different structural belts. Research on carbon isotopes indicated that the $\delta^{13}\text{C}_1$ and $\delta^{13}\text{C}_2$ values are -36.4‰ ~ -19.3‰ and -27.4‰ ~ -19.82‰ , respectively. The identification of natural gas shows that the main type of natural gas in this area is coal-generated gas and is derived from Jurassic source rocks. Carbon isotopic distribution of the northern margin of the Qaidam Basin is characterized by positive sequence, and there are carbon isotope reversal phenomena in some areas due to different maturity, different mixture types of sources and the gas generation from source rocks in the high-mature stage. The distribution of oil and gas reserves in the northern margin of the Qaidam Basin is characterized by spatial zonation from the outer edges to the centre of the basin and is controlled by the source rock maturity. The natural gas is located in mature and high maturity areas. Future promising areas for exploration have been put forward, which include Lenghu NO. 6 and NO. 7, Eboliang-Hulushan tectonic belt and the foreland of the Altun Mountains.

Key words: natural gas origin, carbon isotope, source rock, oil and gas distribution, northern margin of the Qaidam Basin

柴达木盆地北缘断块带(柴北缘)油气勘探始于1954年,经过50多年的油气勘探,柴北缘已经发现东坪、牛东、平台、冷湖五号、马海、马西和南八仙等多个

天然气藏或油藏^[1-2]。其中近年来发现的阿尔金山前带东坪-牛东规模气区,进一步揭示柴北缘天然气勘探具有广阔前景^[2]。开展天然气地球化学特征研究对

收稿日期:2016-05-08;修订日期:2016-09-25。

第一作者简介:田继先(1981—),男,工程师,油气地质。E-mail: tjx69@petrochina.com.cn。

基金项目:中国石油重大科技专项(2016E-01);国家科技重大专项(2016ZX05007)。

于沉积盆地油气勘探具有重要意义^[3]。四川盆地、塔里木盆地及鄂尔多斯盆地等大型含油气盆地在天然气地球化学特征及成因方面已有较为深入的研究^[4-6],对油气勘探起到了重要的指导作用。前人对柴北缘天然气有机地球化学特征和成因类型已有不同程度的探讨^[7-9],但主要集中在冷湖-马仙构造带,随着柴北缘天然气勘探取得重大突破,特别是近期在阿尔金山前发现了东坪-牛东油气田,证实了柴北缘油气分布广泛。前人对于马仙地区天然气研究较多,而对于近年来新发现的平台、冷湖五号及东坪-牛东气田等地区天然气地球化学特征研究较少,亟需开展系统的天然气地球化学特征研究。为了深化柴北缘天然气地球化学特征及天然气成因研究,在采集的新样品和前人分析化验成果基础上,通过大量组份和同位素数据,综合判别天然气成因,分析了油气平面分布规律及控制因素,指出了有利勘探领域,对于进一步深化柴北缘成藏规律研究以及天然气勘探具有重要指导意义。

1 地质背景

柴达木盆地是在前侏罗纪柴达木地块上发育起来

的一个典型的中新生代内陆湖相沉积盆地^[1],四周为三大山脉所夹持,南界为昆仑山,北界为祁连山,西界为阿尔金山。柴北缘位于南祁连山前,是盆地北部的一级构造单元,受多期构造运动影响,发育赛什腾-祁连山前、冷湖-马海、鄂博梁-鸭湖及阿尔金山前等多个构造带(图1)。从老到新,该区揭露的地层单元依次发育了侏罗系、古近系路乐河组、下干柴沟组下段和下干柴沟组上段和新近系上干柴沟组、下油砂山组、上油砂山组、狮子沟组以及第四系七个泉组。该区油气目的层较多,包括新近系、古近系、侏罗系及基岩等。

柴北缘的油气主要来源于中-下侏罗统^[10-11]。柴北缘发育多个侏罗系主力生烃凹陷(图1),包括赛什腾-鱼卡中侏罗统主力生烃凹陷、冷湖下侏罗统生烃凹陷、伊北下侏罗统主力生烃凹陷、昆特依下侏罗统主力生烃凹陷和坪东下侏罗统主力生烃凹陷等,这几个凹陷的侏罗系厚度达100~2 000 m,埋深大,分布面积广。下侏罗统烃源岩以深灰色和灰黑色泥岩为主,有机质类型以Ⅱ-Ⅱ₂为主,有机碳含量平均为1.97%~2.70%,中等以上烃源岩占80%以上,有机质成熟度从低熟-成熟-高熟阶段都有分布。中侏罗统以灰黑色泥岩及少量的炭质泥岩为主,有机碳平均

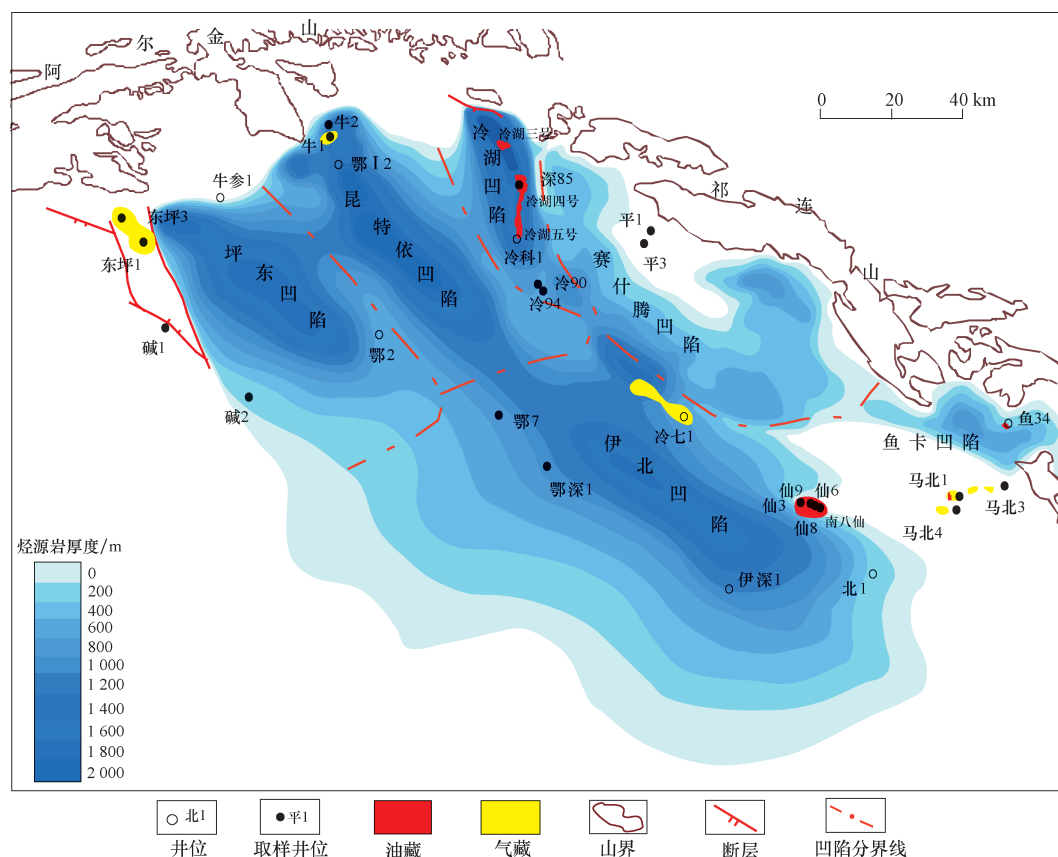


图1 柴达木盆地柴北缘侏罗系烃源岩厚度分布

Fig. 1 Isopach map of the Jurassic source rocks in the northern margin of the Qaidam Basin

为 0.58%~2.15%,其中优质生油岩占 61.27%,有机质类型以Ⅱ-Ⅲ₂型为主,成熟度相对较低。整个柴北缘生气强度大于 20×10⁸ m³/km² 的面积为 12 000 km²,资源量接近 4 903.4×10⁸ m³,资源潜力巨大。

2 天然气地球化学特征

通过对天然气样品的分析测试,结合前人研究成果,综合分析了柴北缘天然气地球化学特征。本次收集了多个柴北缘已发现气藏和油气显示井的天然气样品。天然气组份在 Agilent 6890N 气相色谱仪上完成,分析结果为体积百分比。碳同位素分析在 HP 6890A-DeltaPlus XP 色谱-同位素质谱仪上完成,碳同位素对应于 Pee Dee Belemnite (PDB) 的千分比,分析精度分析精度为±0.5‰,测试结果见表 1。

2.1 天然气组分特征及其分布

天然气组分分为烃类与非烃类,不同气体组分在天然气中所占的比例不尽相同,天然气的组分特征对判识天然气成因及成藏过程具有重要的理论和实际意义。柴北缘天然气均以甲烷气体为主(表 1),重烃含量相对较高,不同构造带天然气组分具有明显的差异。冷湖四号、平台及马北地区的部分天然气样品甲烷含量相对较低,重烃含量相对较高,乙烷和丙烷含量(C₂₊)在 8.24%~23.42%,干燥系数低,C₁/C₁₋₅在 0.76~0.89,氮气含量普遍大于 3%,表现为湿气特征。冷湖五号、鄂博梁、南八仙及东坪构造天然气的甲烷含量相对较高(一般高于 80%),重烃含量相对较低,C₂₊在 0.13%~7.67%,干燥系数高,C₁/C₁₋₅值绝大多数大于 0.95,氮气含量较高,表现为干气特征。

表 1 柴北缘天然气组分与碳同位素特征^[9]
Table 1 Characteristics of gas composition and carbon isotope in the northern margin of the Qaidam Basin^[9]

构造带	井号	层位	同位素组成/‰			组分组成/%			N ₂ /%	C ₁ /C ₁₋₅	R _o
			δ ¹³ C ₁	δ ¹³ C ₂	δ ¹³ C ₃	甲烷	乙烷	丙烷			
冷湖四号	深 85	上干柴沟组	-32.30	-23.36	—	78.66	8.24	—	3.17	0.84	1.10
冷湖五号	冷 94	上干柴沟组	-28.90	-22.80	—	92.40	1.38	0.13	5.81	0.97	1.80
	冷 90	上干柴沟组	-26.00	-23.75	—	93.51	1.20	—	5.27	0.99	2.43
平台	平 3	路乐河组	-30.80	-21.40	-20.90	85.08	6.51	2.16	4.89	0.90	1.50
	平 1	路乐河组	-30.00	-25.10	-23.40	89.38	2.38	—	7.017	0.965	1.62
	平 3	路乐河组	-32.30	-23.40	-23.70	75.35	6.04	2.19	15.30	0.89	1.28
南八仙	仙 3	下油砂山组	-29.40	-22.80	-22.00	89.78	4.58	—	4.36	0.95	1.72
	仙 8	上干柴沟组	-28.92	-24.16	-22.86	90.40	4.53	—	5.34	0.95	1.81
	仙 9	下油砂山组	-27.86	-22.68	-21.17	89.27	4.96	—	5.39	0.95	2.01
	仙试 6	下油砂山组	-28.22	-22.79	-21.29	89.58	4.83	—	5.29	0.95	1.94
马北	马北 4	下干柴沟组	-28.40	-23.18	-20.90	90.25	1.70	—	6.62	0.98	1.90
	马北 1	下干柴沟组	-36.01	-24.83	-20.06	79.91	14.98	—	2.80	0.84	0.89
	马北 3	基岩	-35.30	-25.42	-25.57	73.88	23.42	—	1.43	0.76	0.95
鄂博梁	鄂 7	下油砂山组	-23.80	—	—	96.38	0.13	0.01	3.062	0.998	3.03
	鄂深 1	下油砂山组	-21.20	-22.00	—	91.78	0.207	—	7.382	0.998	3.93
	鄂深 1	下油砂山组	-19.30	-20.70	—	—	—	—	—	—	4.76
东坪	东坪 1	基岩	-25.00	-27.40	-23.60	91.79	2.55	—	5.28	0.97	2.68
	东坪 3	路乐河组	-20.95	-24.20	—	74.66	1.03	0.19	20.87	0.98	4.03
	东坪 3	下干柴沟组	-28.52	-19.82	—	94.27	0.625	0.08	4.62	0.99	1.88
牛东	牛 1	侏罗系	-36.40	-24.47	-23.18	88.83	6.28	1.77	3.99	0.90	0.85
	牛 1	路乐河组	-35.30	-24.10	-22.30	86.18	6.02	1.91	5.24	0.90	0.95
	牛 2	下干柴沟组	-31.60	-22.20	—	90.85	1.18	0.27	3.15	0.97	1.38
碱山	碱 1	下干柴沟组	-23.50	-22.50	-22.20	—	—	—	—	—	3.10
	碱 2	上干柴沟组	-25.00	-20.80	-23.40	—	—	—	—	—	2.68

总体上,盆地中心主要以干气为主,比如东坪、鄂博梁、南八仙及冷湖五号等地区,甲烷含量高,反映其源岩成熟度高。平台、冷湖四号及马北等山前带甲烷含量较低,重烃含量高,反映天然气来自较低成熟度的烃源岩。

2.2 碳同位素特征及其分布

天然气中烃类气体的碳同位素组成是划分天然气成因类型及确定烃源岩成熟度的有效指标。柴北缘天然气碳同位素普遍偏重(表1),绝大部分甲烷碳同位素大于 -38% ,乙烷碳同位素大于 -27.5% 。不同构造带天然气碳同位素又有一定差异。其中冷湖四号、马北构造和牛1井下侏罗纪天然气碳同位素较轻, $\delta^{13}\text{C}_1$ 在 -36.01% ~ -28.4% , $\delta^{13}\text{C}_2$ 在 -25.42% ~ -23.18% ,反映了天然气成熟度较低;冷湖五号、平台、南八仙等构造和东坪3井下干柴沟组上段的天然气碳同位素较重, $\delta^{13}\text{C}_1$ 在 -32.3% ~ -26% , $\delta^{13}\text{C}_2$ 在 -25.1% ~ -19.82% ;而鄂博梁、碱山构造和东坪1井基岩中的天然气碳同位素最重, $\delta^{13}\text{C}_1$ 在 -25% ~ -19.3% , $\delta^{13}\text{C}_2$ 在 -27.4% ~ -20.7% ,反映天然气来自于过成熟源岩。平面上,盆地中心天然气碳同位素明显高于盆缘地区,鄂博梁、碱山、冷湖五号及南八仙地区 $\delta^{13}\text{C}_1$ 小于 -30% ,明显比山前带平台等地区重,反映其源岩成熟度更高。

柴北缘大部分天然气都具有烷烃碳同位素正序分布的特点,即 $\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2 < \delta^{13}\text{C}_3$,部分地区出现同位素“倒转”现象,如鄂博梁和东坪地区(表1),这也表明这些天然气不是原生的,可能经历了散失或混合等作用的改造。戴金星认为天然气烷烃碳同位素值的“倒转”原因有5类^[12],分别是有机与无机烷烃混合、油型气与煤型气混合、同型不同源或同源不同期烷烃混合、生物降解作用及地温变化等。近年来,戴金星通过对页岩气的研究提出,高温环境下可使得碳同位素出现负分布,过成熟阶段的腐泥型页岩气和腐殖型源岩过成熟度阶段的煤成气中同样存在同位素倒转现象^[13],是油气演化进入过成熟阶段的标志。柴北缘天然气碳同位素主体不具备完全反序列特征,且该地区也未发现典型的无机成因烷烃气,因此可以排除有机成因和无机成因烷烃气混合可能。柴北缘侏罗系烃源岩埋深超过3 000 m,不具备细菌活动条件,此外细菌氧化会导致丙烷优先被消耗,使得丙烷碳同位素升高,但柴北缘丙烷碳同位素未出现明显偏高,因此碳同位素部分倒转不是细菌氧化所致。柴北缘主体为煤型气,来自于深层侏罗系源岩,但在靠近一里坪凹陷的碱山构造带,存在新近系源岩裂解气^[7],两种不同母质类型的烃

源岩混合,导致该区碳同位素出现倒转现象。马北地区主要是侏罗系源岩,但该地区既有来自于南部伊北凹陷的侏罗系源岩,又有北部赛什腾凹陷的侏罗系源岩。伊北凹陷侏罗系埋深超过5 000 m,成熟度高,而北部赛什腾凹陷侏罗系埋深较浅,成熟度相对较低,两个凹陷源岩成熟度差别较大,因此不同成熟度源岩混合造成了同位素倒转。东坪气田附近的坪东凹陷侏罗系埋深超过6 000 m,而鄂博梁地区深层侏罗系埋深超过8 000 m,源岩成熟度普遍大于2,处于过成熟阶段,因此烃源岩高温环境可能造成了该地区同位素的倒转,也表明该地区侏罗系源岩处于过成熟阶段。

3 讨论与分析

3.1 天然气成因

烷烃气根据其原始物质来源可分为有机成因和无机成因两大类,其中无机成因气一般具有负碳同位素系列($\delta^{13}\text{C}_1 > \delta^{13}\text{C}_2 > \delta^{13}\text{C}_3 > \delta^{13}\text{C}_4$),且常伴有较高的氦同位素组成,而有机成因烷烃气则与之相反。尽管柴北缘一些气样发生了烷烃碳同位素倒转,但整体上仍表现出正序特点,表现出有机成因烷烃气特征,为有机成因气。

应用X型鉴别图识别生物气、热成气、深层混合气或二次生成气、浅层混合气或瓦斯气,它是利用 $\delta^{13}\text{C}_1$ 与 $\delta^{13}\text{C}_2 - \delta^{13}\text{C}_1$ 组合关系编制的图版,本图版特点对浅层和深层混合气的甲烷和乙烷鉴别优于其他图版^[14]。柴北缘天然气具有较重的甲烷同位素,从图2可以看出,柴北缘属于典型的热成因气,与生物气有明显区别。按照天然气同位素分馏特征,气藏中甲烷碳同位素容易分馏,而乙烷同位素几乎不发生分馏,乙烷

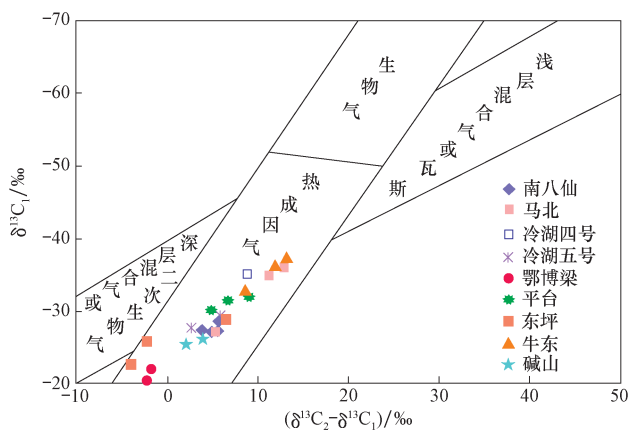


图2 柴达木盆地柴北缘天然气成因类型X形鉴别图

Fig. 2 The X chart for identification of gas genetic types in the northern margin of the Qaidam Basin

等重烃气碳同位素有较强的原始母质继承性,是鉴别煤型气和油型气的有效指标,一般认为乙烷同位素大于 -27.5% 为煤型气。从柴北缘乙烷同位素值可以看出,该地区主要表现出煤型气特点。

在鉴别天然气中某组分成因从属时,用多项指标综合判断比单一指标来鉴别更可靠,如果把用指标识别气的成因类型与具体地质条件结合起来更好^[15]。根据戴金星的天然气成因类型综合识别图版,利用甲烷、乙烷和丙烷同位素特征可进一步判断其天然气成因类型。从图3可以看出,南八仙、马海、冷湖五号、鄂博梁和东坪等地区天然气碳同位素偏重,反映天然气来源于母质类型偏腐殖型的源岩,而冷湖四号构造、马北、平台及牛东地区天然气的碳同位素相对偏轻,反映其来源于母质类型偏腐泥型的源岩,但总体上属于煤型气,气源来自侏罗系烃源岩。

3.2 成熟度及分布特征

天然气成熟度研究对气来源判断具有重要作用。研究认为,天然气碳同位素轻重与其生成时烃源岩演化程度密切相关,两者存在对数关系。煤型气一般采用甲烷碳同位素即 $\delta^{13}\text{C}_1$ (‰)来反算天然气形成时烃源岩的成熟度 R_o 。前人提出过多种计算方法^[16-17],

笔者结合该研究区实际情况,认为刘文汇提出的天然气成熟度回归方程较为适合柴北缘成熟度计算,其公式为:

$$\delta^{13}\text{C}_1 = 48.771\lg R_o - 34.1 \quad (R_o \leq 0.8\%) \quad (1)$$

$$\delta^{13}\text{C}_1 = 22.421\lg R_o - 34.8 \quad (R_o > 0.8\%) \quad (2)$$

根据 $\delta^{13}\text{C}_1$ 计算得到了柴北缘各主要天然气藏形成时的烃源岩成熟度。计算表明,天然气的成熟度分布于 $0.85\% \sim 4.76\%$,变化范围较大。牛1井侏罗系天然气成熟度低, R_o 值为 0.85% ,鄂博梁构造天然气成熟度最高, R_o 值最高可达 4.76% 。从山前带到盆地内部,天然气成熟度呈逐渐增大的趋势(图4),东坪和马北等地区存在多种成熟度的天然气,表明天然气来源多样。

柴北缘地区天然气与石油都有分布,油气相态与成熟度有较大关系。柴北缘烃源岩主要是中-下侏罗统煤系烃源岩,埋深变化较大,低成熟-成熟-高成熟阶段都有分布, R_o 分布于 $0.5\% \sim 4.7\%$ 。根据镜质体反射率,传统石油地质学理论将烃源岩的演化阶段分为:未成熟阶段, $R_o \leq 0.5\%$;低成熟阶段, $0.5\% < R_o < 0.8\%$;成熟阶段, $0.8\% < R_o \leq 1.3\%$;柴北缘地区天然气与石油都有分布,油气相态与成熟度有较大关系。柴北缘烃源岩主要是中-下侏罗统煤系烃源岩,埋深

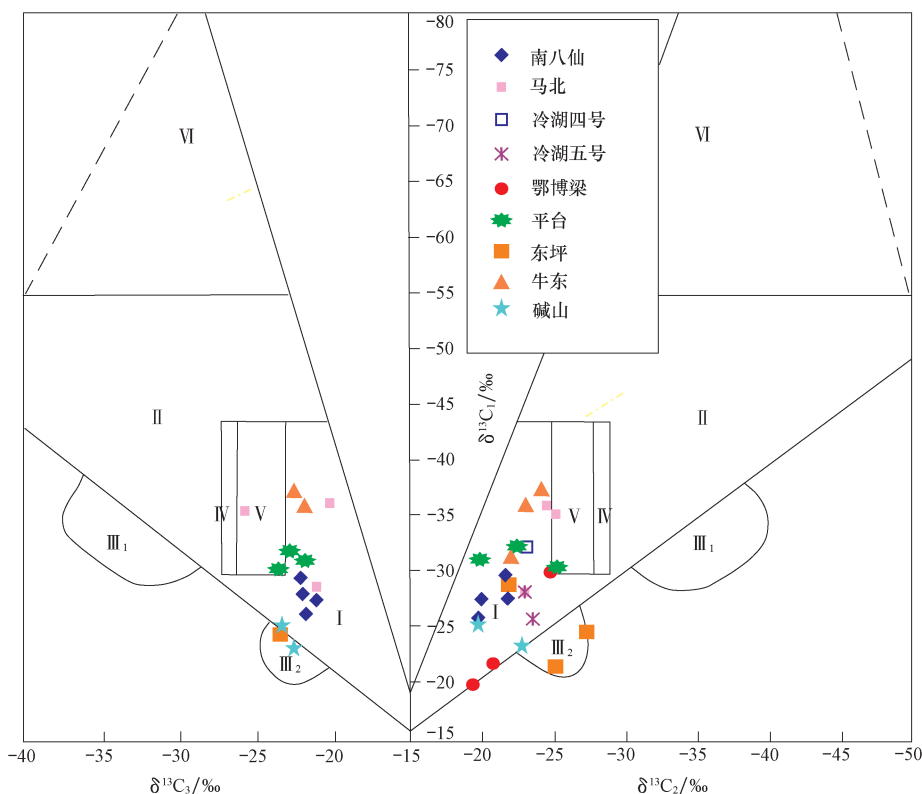


图3 柴达木盆地柴北缘天然气成因类型综合判别图

Fig. 3 Composite plot for identification of gas genetic types in the northern margin of the Qaidam Basin

I. 煤成气区; II. 油型气区; III. 碳同位素系列倒转混合气区; IV. 煤成气和油型气区; V. 煤成气、油型气和混合气区; VI. 生物气区和亚生物气区

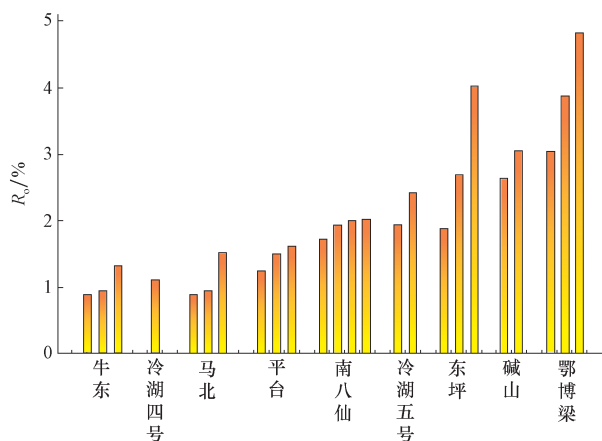


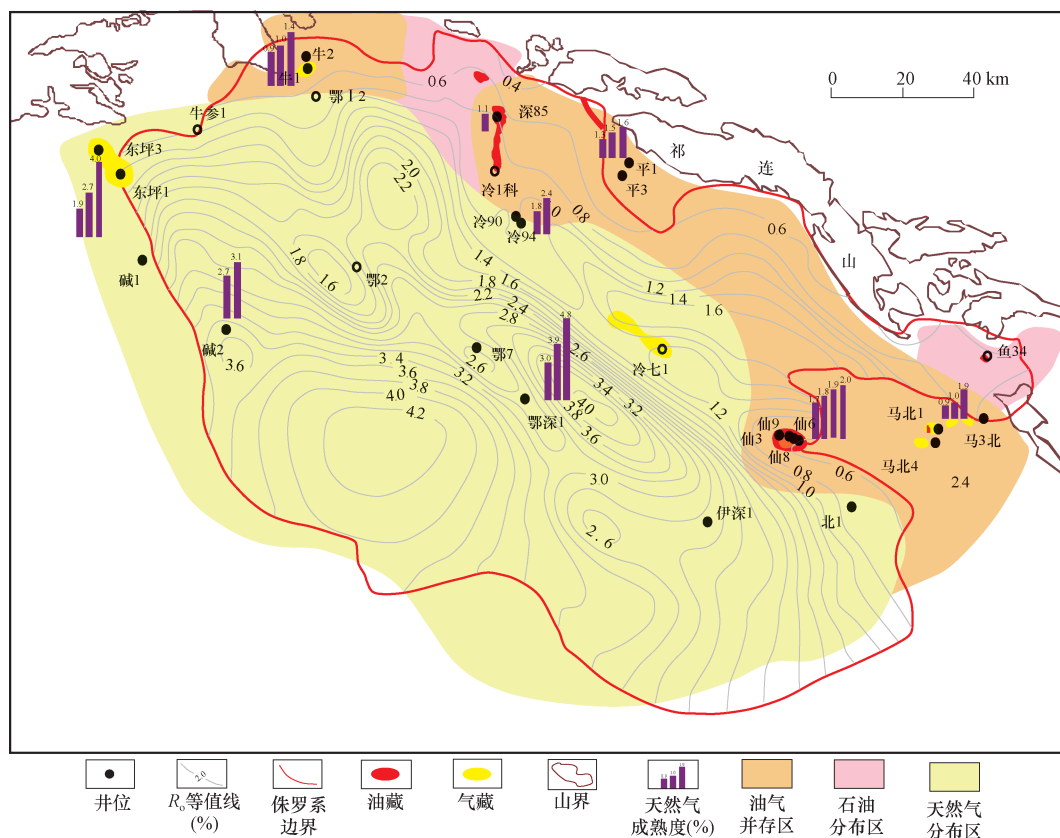
图4 柴北缘天然气计算成熟度分布

Fig. 4 Distribution of calculated natural gas maturity in the northern margin of the Qaidam Basin

变化较大,低成熟—成熟—高成熟阶段都有分布, R_o 分布于0.5%~4.7%。根据镜质体反射率,传统石油地质学理论将烃源岩的演化阶段分为:未成熟阶段, $R_o \leq 0.5\%$;低成熟阶段, $0.5\% < R_o \leq 0.8\%$;成熟阶段, $0.8\% < R_o \leq 1.3\%$;高成熟阶段, $1.3\% < R_o \leq 2\%$;过成熟阶段, $R_o > 2\%$ 。根据侏罗系烃源岩底界现今 R_o 分布(图5)可以看出:①鱼卡地区侏罗系底界 R_o 值小

于0.8%,处于低成熟阶段,因此鱼卡地区以石油为主。②冷湖三号至五号,成熟度依次增大,且大部分地区侏罗系底界 R_o 值大于0.8%小于1.0%,处于成熟阶段。从碳同位素数据来看,从冷湖三号至南八仙,天然气 $\delta^{13}C_1$ 依次增大,表明天然气烃源岩的成熟度依次增大。因此冷湖三号主要以石油为主,而到冷湖五号,源岩成熟度变高,以湿气为主,气源都来自深层冷湖凹陷侏罗系源岩(图1)。③牛东、冷东、平台、南八仙、马海地区侏罗系底界 $0.6\% < R_o < 1.3\%$,处于主要生油时期的“生油窗”阶段,有机质能够大量转化为石油和湿气,因此油气共生。以上地区既有油藏,也有气藏或者存在石油伴生气,已经证实了这一点。平台和冷东地区侏罗系本身缺失,气源为南部赛什腾凹陷侏罗系,高、低成熟度源岩都有分布,油气都有分布;马海和南八仙地区既有来自于南部伊北凹陷的侏罗系源岩,又有北部赛什腾凹陷的侏罗系源岩,两个凹陷源岩成熟度变化较大,油气都有分布;牛东地区同样有来自于深层昆特依凹陷不同成熟度的气源,油气都有分布。

相对于盆缘带,盆内晚期构造带上的冷湖五号四高点—冷湖六号—七号、鄂博梁—葫芦山—鸭湖构造带、东坪、碱山和红三旱地区中—下侏罗纪底界 R_o 。

图5 柴达木盆地柴北缘侏罗系烃源岩 R_o 等值线与油气分布图Fig. 5 Contour map of R_o in the Jurassic source rocks and the oil and gas distribution in the northern margin of the Qaidam Basin

值大于 1.3%, 最高超过 4.0%, 处于高 - 过成熟阶段, 干酪根和已形成的石油将发生热裂解, 主要是甲烷及其气态同系物, 因此该区带主要以纯气藏为主, 该区带内的东坪和冷湖五号四高点证实为是纯气藏, 其它地区见到气显示或者低产气流。东坪地区气源主要来自于深层坪东凹陷^[18-19], 侏罗系埋深大, 成熟度高; 伊北凹陷侏罗系埋深 7 000 m 以上, 演化程度高, 以生气为主, 因此该地区以纯气藏为主, 这点也从天然气成熟度上反应出来, 计算天然气成熟度非常高, 以干气为主。以上所述充分证明了烃源岩的成熟度控制油气的分布, 即: 石油分布在低熟 - 成熟源岩区及附近, 而天然气分布在成熟 - 高成熟乃至过成熟的源岩区, 油气共存区位于成熟源岩区及附近。

受烃源岩成熟度控制,柴北缘油气分布在平面上具有分带性(图5)。从盆地边缘到盆地中心,油气分布具有两个不同的区带。外区带为油气混合区,分布在阿尔金和祁连山前,包括牛东、冷湖三号-五号、冷东、平台、南八仙、马海和鱼卡等油气田。外带油气成熟度相对较低, R_o 主要分布在 0.5%~2.0%,因此油气都有分布。内区带为天然气分布区,包括冷湖六号-七号、鄂博梁-葫芦山-鸭湖构造带、东坪、碱山和红三旱地区。该地区烃源岩成熟度高,以高成熟-过成熟为主,处于生气阶段,因此该区带以纯气藏为主。在垂向上,柴北缘侏罗系烃源岩直接覆盖于基岩之上,古近系一新近系与侏罗系或基岩呈不整合接触(图6),油气分布同样与侏罗系烃源岩成熟度密切相关。冷湖六号、冷湖七号及鄂博梁等晚期构造带上,侏罗系源岩埋深较大,成熟度非常高,处于生气阶段,其浅层勘探目的层以天然气藏为主,天然气组分上也表现为干气特征。阿尔金山前带及祁连山前带油气主要分布在古近系及基岩中^[11],其油气分布同样与附近凹陷侏罗系烃源岩成熟度有关。冷湖三号侏罗系埋深浅,成熟度低,以石油为主。马海-南八仙地区有来自南北两个不同凹陷的烃源岩,高、低成熟度烃源岩共存,油气都有分

布(图6)。因此,烃源岩成熟度控制了油气分布。

4 石油地质意义

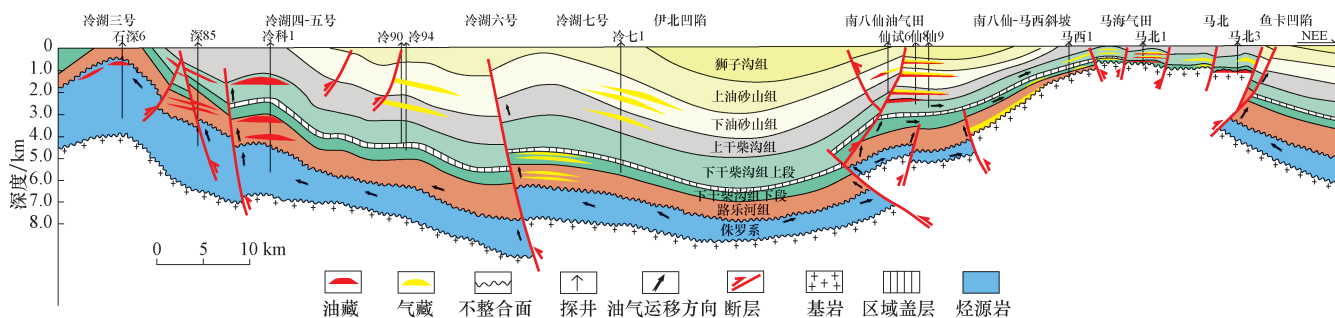
天然气地球化学特征研究有助于明确天然气成因特征,进而追踪其源岩有机质类型和成熟度等信息,阐明油气分布规律,与油气成藏关系密切,可进一步探讨勘探方向,具有重要的地质意义。

从前面论述可知,从烃源岩成熟度与油气田分布关系密切,烃源岩的成熟度控制了天然气平面分布,天然气主要分布在成熟-高成熟源岩区,因此天然气有利区带位于主力烃源岩 R_o 值大于 0.8% 的构造带上,侏罗系烃源岩 R_o 值大于 0.8% 的面积近 20 000 km² (图 5),资源潜力巨大。柴北缘伊北凹陷侏罗系埋深大,源岩成熟度达到 2% 以上,其上部冷湖六号-冷湖七号以及鄂博梁-葫芦山构造带发育大型构造圈闭(单个构造面积超过 160 km²),有深大断裂沟通气源,是有利天然气勘探领域。另外,阿尔金山前带紧邻昆特依凹陷和坪东凹陷,这两个凹陷源岩成熟度同样较高,源岩可通过深大断裂沟通运移至山前聚集成藏^[20],是下一步天然气勘探有利地区,近年来在东坪-牛东地区天然气勘探已经获得突破,证实该构造带是柴北缘天然气勘探最现实领域。

5 结论

1) 柴北缘天然气以甲烷为主,重烃含量较高,不同构造带天然气组分具明显差异。冷湖四号和马北构造带天然气以湿气为主,而东坪和牛东等构造带天然气干燥系数高大于 0.95,具有明显干气特征。从山前带到盆地内部,天然气成熟度呈逐渐增大的趋势。

2) 柴北缘天然气普遍具有碳同位素偏重的特点,成因分析表明为典型的煤型气。大部分地区天然气烷烃碳同位素正序分布,部分地区碳同位素出现倒转,主



要是受不同成熟度、不同类型源岩混合以及过成熟阶段源岩等因素影响。

3) 侏罗系烃源岩的成熟度控制油气在平面上的分布,即:石油分布在低熟-成熟源岩区及附近,而天然气分布在成熟-高成熟乃至过成熟源岩区。

4) 根据天然气平面分布控制因素,指出冷湖六号-冷湖七号、鄂博梁-葫芦山构造带以及阿尔金山前是下一步天然气勘探的重点领域,其中阿尔金山前构造带是最现实领域。

参考文献

- [1] 付锁堂. 柴达木盆地天然气勘探领域[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(4): 1-10.
Fu Suotang. Natural gas exploration in Qaidam Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(4): 1-10.
- [2] 付锁堂, 汪立群, 徐子远, 等. 柴北缘深层气藏形成的地质条件及有利勘探区带[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(6): 841-846.
Fu Suotang, Wang Liqun, Xu Ziyuan, et al. Geological conditions of deep gas pools and their favorable prospects[J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(6): 851-846.
- [3] 王庭斌, 董立, 张亚雄. 中国与煤成气相关的大型、特大型气田分布特征及启示[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 167-182.
Wang Tingbin, Dong Li, Zhang Yaxiong. Distribution of large and giant coal-related gas fields in China and its significance[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 167-182.
- [4] 吴小奇, 刘光祥, 刘全有, 等. 四川盆地元坝-通南巴地区须家河组天然气地球化学特征和成因[J]. 石油与天然气地质, 2015, 35(6): 955-962+974.
Wu Xiaochi, Liu Guangxiang, Liu Quanyou, et al. Geochemical characteristics and origin of natural gas in the Xujiahe Formation in Yuanba-Tongnanba area of Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 35(6): 955-962+974.
- [5] 李吉君, 曹群, 卢双舫, 等. 四川盆地乐山-龙女寺古隆起震旦系天然气成藏史[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(1): 30-36.
Li Jijun, Cao Qiong, Lu Shuangfang, et al. History of natural gas accumulation in Leshan-Longnyusi Sinian paleo-uplift, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1): 30-36.
- [6] 顾忆, 黄继文. 塔河油田天然气特征对比与成因分析[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 820-826.
Gu Yi, Huang Jiwen. Characteristics comparison and origin of natural gas in Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 820-826.
- [7] 赵东升, 李文厚, 吴清雅, 等. 柴达木盆地天然气的碳同位素地球化学特征及成因分析[J]. 沉积学报, 2006, 24(1): 135-140.
Zhao Dongshen, Li Wenhui, Wu Qingya, et al. Characteristics of carbon isotope and origin of natural gas in Qaidam Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(1): 135-140.
- [8] 宋成鹏, 张晓宝, 汪立群, 等. 柴达木盆地北缘天然气成因类型及气源判识[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(1): 90-96.
Sun Chengpeng, Zhang Xiaobao, Wang Liqun, et al. A study on genetic types and source discrimination of natural gas in the north margin of the Qaidam Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(1): 90-96.
- [9] 田光荣, 阎存凤, 妥进才, 等. 柴达木盆地柴北缘煤成气晚期成藏特征[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(6): 1028-1032.
Tian Guangrong, Yan Cunfeng, Tuo Jincai, et al. Late hydrocarbon accumulation characteristic of coal related gas in northern Qaidam Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(6): 1028-1032.
- [10] 翟志伟, 张永庶, 杨红梅, 等. 柴达木盆地北缘侏罗系有效烃源岩特征及油气聚集规律[J]. 天然气工业, 2013, 33(9): 36-42.
Zhai Zhiwei, Zhang Yongshu, Yang Hongmei, et al. Characteristics of effective source rocks in the Jurassic and hydrocarbon accumulation patterns in the areas near the northern margin of the Qaidam Basin[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(9): 36-42.
- [11] 田继先, 孙平, 张林, 等. 柴达木盆地北缘山前带平台地区天然气成藏条件及勘探方向[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(4): 526-531.
Tian Jixian, Sun Ping, Zhang Lin, et al. Accumulation conditions of natural gas and exploration domains in Pingtai area, piedmont zone of the north Qaidam[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(4): 526-531.
- [12] 戴金星. 概论有机烷烃气碳同位素系列倒转的成因问题[J]. 天然气工业, 1990, 10(6): 15-20.
Dai Jinxing. A brief discussion on the problem of the geneses of the carbon isotopic series reversal in organogenic alkane gases[J]. Natural Gas Industry, 1990, 10(6): 15-20.
- [13] 戴金星, 倪云燕, 黄士鹏, 等. 次生型负碳同位素系列成因[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(1): 1-7.
Dai Jinxing, Ni Yunyan, Huang Shipeng, et al. Secondary origin of negative carbon isotopic series in natural gas[J]. Journal of Natural Gas Geoscience, 2016, 27(1): 1-7.
- [14] 黄汝昌, 李景明. 中国凝析气藏的形成与分布[J]. 石油与天然气地质, 1996, 17(3): 237-242.
Huang Ruchang, Li Jinming. Formation and distribution of condensate gas pools in china[J]. Oil & Gas Geology, 1996, 17(3): 237-242.
- [15] 戴金星, 于聪, 黄士鹏, 等. 中国大气田的地质和地球化学若干特征[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 1-13.
Dai Jinxing, Yu Cong, Huang Shipeng, et al. Geological and geochemical characteristics of large gas fields in China[J]. Petroleum Exploration & Development, 2014, 41(1): 1-13.
- [16] 刘文汇, 徐永昌. 煤型气碳同位素演化二阶段分馏模式及机理[J]. 地球化学, 1999, 28(4): 359-366.
Liu Wenhui, Xu Yongchang. A two stage model of carbon isotopic fractionation in coal gas[J]. Geochimica, 1999, 28(4): 359-366.
- [17] 戴金星. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别[J]. 天然气地球科学, 1993, 14(2/3): 1-40.
Dai Jinxing. Carbon and hydrogen isotopic compositions and origin identification of different types natural gas[J]. Natural Gas Geoscience, 1993, 14(2/3): 1-40.
- [18] 曹正林, 魏志福, 张小军, 等. 柴达木盆地东坪地区油气源对比分析[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(3): 17-20.
Cao Zhenglin, Wei Z, Zhang X, et al. Oil-gas source correlation in Dongping area, Qaidam Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25(3): 18-20.
- [19] 曹正林, 孙秀建, 汪立群, 等. 柴达木盆地阿尔金山前东坪-牛东斜坡带天然气成藏条件[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(6): 105-1131.
Cao Zhengling, Sun Xiujian, Wang Liqun, et al. The gas accumulation conditions of Dongping-Niudong slope area in front of Aejin mountain of Qaidam basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(6): 1125-1131.
- [20] 张正刚, 袁剑英, 陈启林. 柴北缘地区油气成藏模式与成藏规律[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(5): 649-652.
Zhang Zhengang, Yuan Jianying, Chen Qiling. Reservoiring patterns and accumulation regularity in northern of Qaidam Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(5): 649-652.

(编辑 张玉银)