

缅甸瑞宝盆地非烃气成因及其地质意义

赵厚祥

(中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028)

摘要:非烃气成因类型的研究与烃类气的生成、运移、聚集成藏有密切联系。瑞宝盆地天然气具有有机成因烃类气与无机成因烃类气、非烃气混源特征;烃类气以甲烷为主;非烃气为 N_2 、 H_2 、 CO_2 、 CO 及 H_2S ;利用单因子($\delta^{13}C_1$ 或 $\delta^{13}C_{CO_2}$)方法判别天然气成因存在一定偏差, $\delta^{13}C_{CO_2} - \delta^{13}C_1$ 、 $\delta^{13}C_1 - R_0$ 等二元关系图版并考虑沉积背景综合判别效果好;有机成因烃类气主要来源于煤系烃源岩,有机成因非烃气主要来源于煤和干酪根的热解;无机成因烃类气、非烃气主要来源于碳酸盐岩的高温还原作用和火山活动。控盆深大断裂及火山岩的空间分布规律是控制非烃气富集的主要因素。非烃气的赋存对烃源岩的演化、油气运移聚集、储层质量以及成藏组合都有积极的地质指向意义。

关键词:非烃气 二氧化碳 硫化氢 有机成因 无机成因

中图分类号:TE122

文献标志码:A

Origin and geological significance of non – hydrocarbon gas in Shwebo Basin, Myanmar

ZHAO Houxiang

(CNOOC Research Institute Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract:The study of non – hydrocarbon gas genetic types has a close relationship with generation, migration and accumulation of hydrocarbon gas. Gas in Shwebo Basin is characterized by organic and inorganic mixed source of non – and hydrocarbon gases. Hydrocarbon gas is CH_4 based, while non – hydrocarbon is mainly composed of N_2 , H_2 , CO_2 , CO and H_2S . The genetic type of natural gas determined by using binary relation plate is better than using single factor because of some deviations. According to the organic origin, the hydrocarbon gas comes mainly from the coal – measure source rocks and the non – hydrocarbon gas comes from mainly the pyrolysis of coal and kerogen. However, based on the inorganic origin, the non – and hydrocarbon gases come from mainly high temperature reduction of carbonate rocks and volcanic activity. The deep boundary fault and the distribution of volcanic rocks are the key factors controlling the non – hydrocarbon gas accumulation. The occurrence of non – hydrocarbon gas has a positive guiding meaning for source rock evolution, hydrocarbon migration and accumulation, reservoir quality and play.

Key words: non – hydrocarbon gas; carbon dioxide; sulfuretted hydrogen; organic origin; inorganic origin

目前国内外对非烃气成因机制的研究存在不同的看法,对于非烃气的分析并不是很系统,主要是由于非烃气成藏条件难以把握,而且纯非烃气藏非常少,拥有的资料也不多。本文旨在对国外盆地非烃气的产状以及分布进行综合分析,以期达到借助有效的方法对非烃气特征进行详细判别、对其成因机制进行评价并能进一步分析烃类气的生成、运移、聚集成藏的目的。

和稀有气体(He/Ar 等)^[1-2]。非烃气体大多数情况下以微量组分存在于天然气中。在特殊的地质条件下,也可以富集成藏。研究天然气非烃组分及其同位素组成可以探讨天然气的来源、运移和聚集等问题。

(1) CO_2 是天然气中常见的非烃组分之一。有机成因 CO_2 是有机质在不同地球化学作用中形成

1 非烃气研究进展

天然气中主要非烃组分为 CO_2 、 N_2 、 H_2 、 Hg 、 H_2S

收稿日期:2018-07-24;改回日期:2018-12-03。

作者简介:赵厚祥(1971—),硕士,高级工程师,从事海外石油勘探研究工作。E-mail:zhaohx3@cnooc.com.cn。

的。有机质在生物化学作用、热解作用和裂解作用等成烃作用下形成 CO_2 , 也可以经煤的氧化作用形成。有机质氧化生成 CO_2 、热模拟产生的气体和大部分石油伴生气中 CO_2 的碳同位素组成比较轻^[3]。无机成因的 CO_2 是无机矿物或元素在各种化学作用下形成的。无机成因 CO_2 的形成有多种途径: ① 岩浆-火山源成因的 CO_2 ; ② 变质成因的 CO_2 ; ③ 地幔成因的 CO_2 ; ④ 宇宙说。

对于 CO_2 成因的判别标准有多种方法, 目前比较统一的认识是基于 CO_2 同位素的统计分类^[2,4-6], 其它方法 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} - \text{CO}_2$ 含量关系图版^[5] 以及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} - \delta^{13}\text{C}_1$ 关系图版^[7] 可综合判定。

(2) 在天然气地质研究中, H_2S 气体地质研究比烷烃气地质研究薄弱得多。尽管如此, 我国以往对 H_2S 天然气地质研究获得了一个重要结论: 我国高含 H_2S 天然气均在碳酸盐岩储集层中, 碎屑岩 H_2S 含量绝大部分在民用安全标准 (20 mg/m^3 , 相当于 13.9 ppm) 之下。此规律与世界含 H_2S 气藏的分布规律 (大约有 400 个, 其中 360 个以上分布在硫酸盐岩-碳酸盐岩地层组合中) 一致^[8]。

H_2S 分为有机成因和无机成因两大类。无机成因 H_2S 来自地球深处, 与火山活动有关, 至今没有发现由其形成的气田 (藏)。目前发现的高 H_2S 气田的 H_2S 气体均为有机成因: 高温还原成因、生物还原成因、裂解成因^[9]。高温还原成因主要见于硫酸盐与碳酸盐沉积组合中^[9-10]; 生物还原成因常见于经历地质时期相对较短, 成熟度相对较低的气藏^[10-12]; 裂解成因 H_2S 往往赋存于碳酸盐岩地层中^[9-10]。 H_2S 与 CO_2 含量具有一定的相关性^[12]。研究发现, H_2S 的形成过程可以促进储层次生孔隙的发育^[13]。

非烃气的成因分析、非烃气对烃源岩的生、运、聚指向以及工程防护都是非烃气下步研究方向^[1-13]。

2 缅甸瑞宝盆地地质特征

2.1 盆地概况

缅甸中央盆地是晚白垩世以来发育的中-新生代盆地, 沉积了厚度达 $20 \sim 25 \text{ km}$ 的上白垩统及新生界地层。瑞宝次盆是中央盆地的二级盆地, 位于中央盆地的中北部, 西部与中央盆地的另一次级盆地——钦敦盆地隔中央岛弧带相望。瑞宝次盆面积 $26\,506 \text{ km}^2$, 目前有探井 3 口, 均位于中央岛弧带控

盆深大断裂附近。

2.2 盆地基底

一般将前中生界作为盆地基底。基底形态较为单一 (图 1、2), 基底岩性主要由火山岩、板岩及页岩等岩性构成。在盆地西部岛弧带钻井揭示基底为浅色花岗闪长岩, 其它基底岩性主要出露在盆地西部山前隆起区。

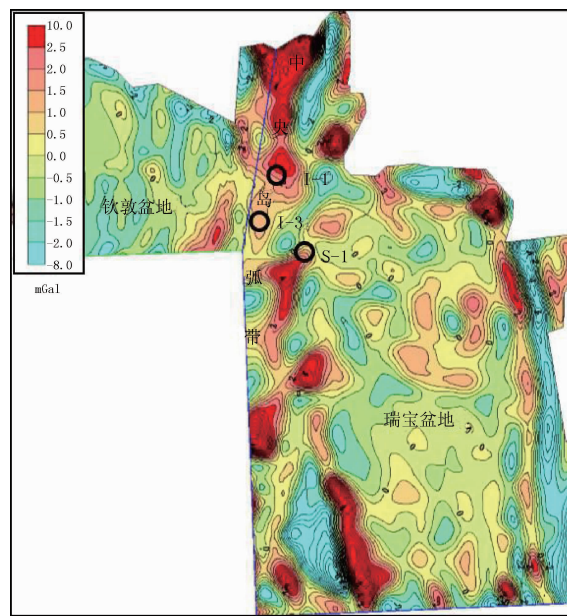


图1 钦敦、瑞宝盆地重力异常

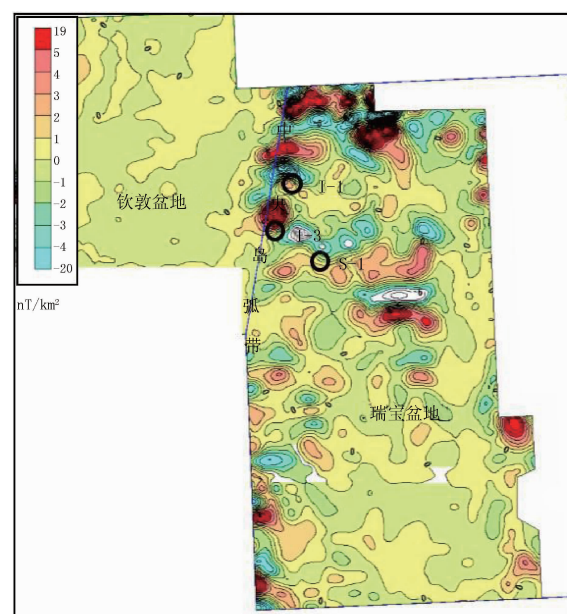


图2 钦敦、瑞宝盆地航磁异常

2.3 盆地盖层及烃源岩

瑞宝盆地盖层主要发育上白垩统、古新统、始新统、渐新统、中新统、上新统以及第四系地层。白垩系-始新统, 海相-三角洲相沉积为主, 主要发育浅

海相—滨岸相—三角洲相沉积夹杂火山碎屑沉积,局部发育泻湖相沉积。白垩系岩性主要为暗灰色泥岩和灰白色砂岩互层。盆地西缘的 S-1 井在深部钻遇阿尔必—森诺曼期灰岩,层理发育,含碳质,局部夹绿灰色泥岩或砂质灰岩条带,厚度 149.6 m。I-1 井钻遇泥灰岩 2 m。古新统上部为灰色、棕黑色碳质泥岩、煤层与灰色粉砂岩互层,夹灰白色泥灰岩;始新统岩性主要为暗灰色泥岩和灰白色砂岩互层。中新统—上新统,河流相沉积,三角洲—辫状河沉积为主,中新统岩性主要为灰色、绿灰色泥岩与灰白色砂岩互层;上新统—第四系岩性主要为灰色砂岩、含砾中砂岩与灰色泥岩互层。

据相邻钦敦盆地勘探资料分析,钦敦盆地主要发育上白垩统—始新统煤系烃源岩,局部地区存在渐新统烃源岩。瑞宝盆地演化史与之相同,预测也存在类似烃源岩,但勘探程度低、钻井少。据有限的钻井和野外露头样品表明,始新统 Yaw 组和 Pondaung 组泥岩总碳为 0.20%~3.38%,平均为 0.73%,有机碳为 0.17%~2.49%,平均为 0.51%,产烃潜量为 0.03~4.62 mg/g,平均为 0.70 mg/g,为差烃源岩(依据煤系烃源岩标准);渐新统 Shwezetaw 组泥岩总碳平均为 0.86%,有机碳平均为 0.49%,产烃潜量平均为 1.16 mg/g,也为差烃源岩。 $HI-T_{max}$ 关系图表征有机质类型为 II₂—III 型。在包裹体中有少数样品显弱蓝白色荧光,说明油气充

注差,油气成熟度低。深层位的烃源岩基本成熟, R_0 在 0.6%~1.2% 之间。

2.4 火山岩

瑞宝盆地火山岩包含浅成侵入花岗岩、闪长岩、安山岩、粗面岩、流纹岩,以及较少的枕状玄武岩。钻探揭示了白垩纪—古新世、始新世—中新世两大火山旋回,每个旋回又具有多期、间歇性喷发的特点。

白垩纪—古新世火山岩旋回主要发育钾玄岩—高钾钙碱性玄武岩及玄武质安山岩,多发育在俯冲作用相关的构造背景;始新世—中新世火山旋回主要发育钙碱性玄武质安山岩—流纹岩,多发育在板块汇聚边缘及造山环境中。

由于探井在勘探相带及层位上未能揭示盆地烃源岩的真实潜力,为了充分利用分析化验资料,挖掘盆地勘探潜力,下面通过研究非烃气的特征,探讨非烃气的成因,深化地质认识,分析评估上白垩统和始新统烃源岩潜力和成藏特征。

3 非烃气分布特征

瑞宝盆地非烃类气包括 CO₂、N₂、H₂、CO、H₂S 气体(表 1),根据 I-3 井测试气样、I-1 井录井气样可知,烃类气与非烃气混合赋存于储层中,暂未发现非烃气单独成藏。本文主要针对 CO₂、H₂S 进行分析研究。

表 1 气体样品地球化学参数

取样点	取样深度/m	天然气主要组分/%											碳同位素(PDB)/‰		备注
		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	N ₂	H ₂	CO ₂	CO	O ₂	H ₂ S	δ ¹³ C ₁	δ ¹³ CO ₂	
I-1	2 032.0	79.221	0.019	0.008	0.000	0.000	7.529	0.000	13.100	0.000	0.123	0.000	-19.97	-22.96	录井气样
	1 267.0	87.968	0.026	0.041	0.018	0.000	8.282	0.000	3.500	0.000	0.165	0.000	-20.67	-20.88	录井气样
	1 195.0	69.326	0.028	0.000	0.000	0.000	22.287	0.000	8.200	0.000	0.159	0.000	-0.28	-16.81	录井气样
	1 161.0~1 166.0	68.307	0.315	0.104	0.079	0.064	18.158	0.000	12.770	0.000	0.203	0.000	-7.52	-16.56	录井气样
I-3	1 150.0~1 254.3	40.703	0.088	0.030	0.001	0.001	21.152	16.549	6.121	14.917	0.377	0.061	-29.31	-41.94	测试气样

3.1 CO₂

瑞宝盆地 CO₂ 气体纵向主要分布在始新统—古新统,深度介于 965~2 312 m。平面上分布在盆地西部岛弧带(图 1、2)。CO₂ 气体含量主要分布于 3%~15%,最大含量为 20.18%。

3.2 H₂S

通过录井气体组分分析及测试中检测仪检测,均证实 H₂S 气体存在。垂向上分布于始新统 1 150

~1 254.3 m,平面上分布在盆地西部岛弧带(图 1、2)。测试中检测仪记录 H₂S 气体含量 0.061%(610 ppm),远超安全标准。

4 成因类型分析

由于非烃气与烃类气伴生及混合赋存状态,利用非烃气的组分及碳同位素分析数据等地化特征(表 1),通过单因素、多因素图版解读及相互验证,

I-3 取样点气样根据图 3、4、5 判定知气体为

煤成气、油型裂解气与无机气混合物,有机气含量高。

地质分析:I-1、I-3 井区域 1 200 m 以上发育数百米厚的始新世-中新世喷发火山岩,对 1 150 ~ 1 254 m 深度点气影响较大,分析认为火山活动或深大断裂应该是无机气的来源。盆地多发育碳质泥岩及煤层烃源岩,是煤成气主要来源。I-3 井相对 I-1 井更趋于沉积中心,有机质类型由 III 型逐步改变为 II 型,气、油同生,后期形成部分油型裂解气。该样品点 CO_2 同位素数值为有机成因且数值偏轻,具有油型裂解气的特征。综合判定 I-3 取样点气体是有机成因煤型气为主,混有部分油型裂解气及少量无机成因天然气。

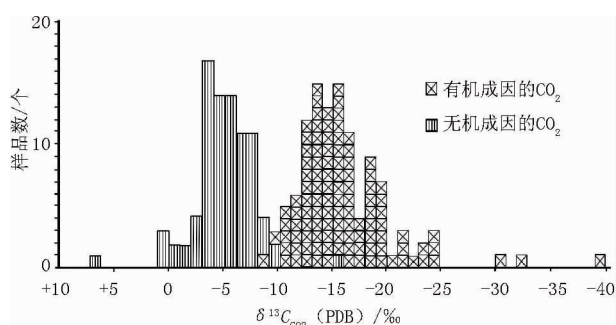


图 4 中国有机成因和无机成因二氧化碳 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 频率^[5]

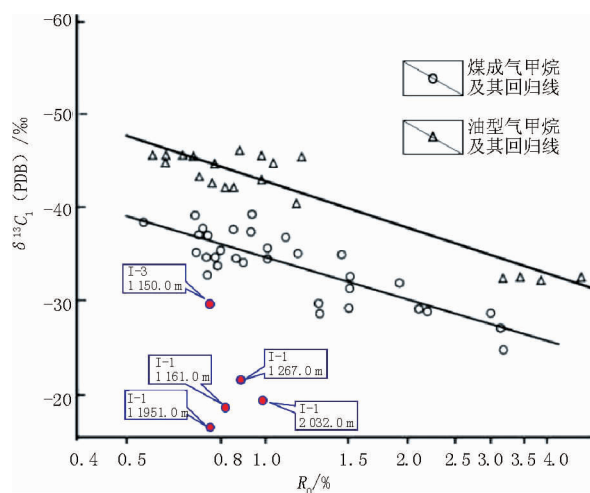


图 5 我国煤成气和油型气 $\delta^{13}\text{C}_1 - R_0$ 关系^[5]

4.2 CO_2 成因类型分析

4.2.1 成因判别

瑞宝盆地二个取样点的 5 个样品的 CO_2 浓度在 3.5% ~ 13.1% 之间, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 数值都小于 -10‰ , 依据有机成因和无机成因二氧化碳 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 频率图(图 4)判别为有机成因^[2,5]。考虑到同深度点甲烷气以有机成因为主,并含有部分无机气的混源特征以及火山沉积背景,利用 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} - \delta^{13}\text{C}_1$ 关系图版

(图 6)判别 CO_2 为有机成因与无机成因混源气,有机成因为主,无机成因为辅。

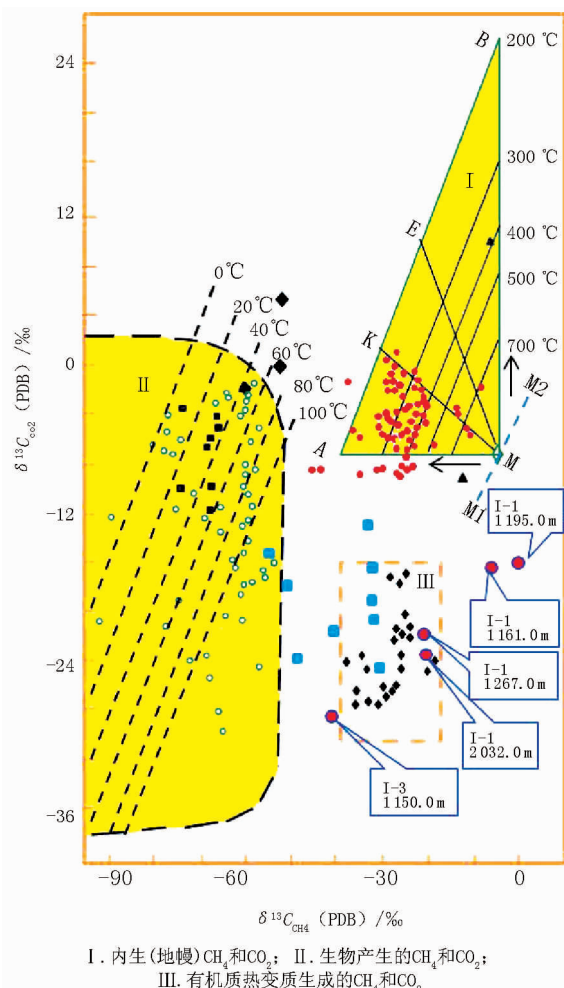
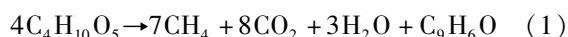


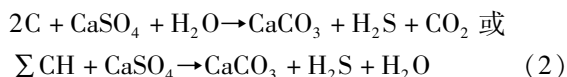
图 6 自然界 CH_4 与 CO_2 共生体系的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值分布^[7]

4.2.2 气体来源

分析认为煤和干酪根热解是 CO_2 有机成因的主要来源;在沉积有机质煤化过程中,纤维素在泥炭化和腐殖煤转化的过程中产生 CO_2 ^[2],可用式(1)表示。瑞宝盆地 R_0 一般处于 0.6% ~ 1.2% 之间,达到了烃源岩成熟门限,煤和干酪根热解产生大量 CO_2 。



火山活动与碳酸盐岩的高温还原反应是 CO_2 无机成因的主要来源。瑞宝盆地纵向上发育白垩纪-古新世、始新世-中新世两期火山沉积,平面上沿火山岛弧带与控盆深大断裂分布;钻探证实瑞宝盆地发育碳酸盐岩,硫酸盐岩和碳酸盐岩常共同分布^[15-16]。硫酸盐在有机物(以 C 为代表)或烃类(以 CH 代表)的参与下发生高温还原作用,形成 CO_2 和 H_2S ^[2],其反应式为



4.3 H₂S 成因类型分析

根据烷烃气成因、CO₂ 与 H₂S 的相关性^[1-2]并结合沉积背景分析 H₂S 的成因。

4.3.1 成因分析

在埋深、地温适宜的地层条件下,含碳酸盐岩地层有机质热演化过程中,有机质和 H₂ 使硫酸盐还原,在有机质的热演化过程中烃类物质的参与下生成 H₂S^[16]。考虑到烷烃气与 CO₂ 气有机成因居多,认为 H₂S 有机成因占较大比例。

4.3.2 高温还原成因

瑞宝盆地发育硫酸盐岩和碳酸盐岩,根据反应式(2)地层产生 H₂S。H₂S 的分布与碳酸盐岩沉积具有密切的关系。

瑞宝盆地 I-1、I-3 取样点石英颗粒流体包裹体均一温度范围 81.9 ~ 158.1℃,平均温度 125.3℃,代表了流体运移时的温度状况,适于碳酸盐岩-硫酸盐岩热化学还原作用的温度范围 100 ~ 140℃^[17-18],认为瑞宝盆地 H₂S 高温还原成因占有一定比例。

4.3.3 火山成因

瑞宝盆地发育白垩纪-古新世、始新世-中新世两期火山沉积,I-1、I-3 采样点为始新统底部,深度位于两期火山沉积之间;瑞宝盆地断裂具有早期张性、晚期压扭的特点;结合烷烃气、CO₂ 的部分无机成因,综合认为 H₂S 无机火山、地幔成因占有一定比例。

5 非烃气赋存的地质意义

非烃气在很大程度上与烃类天然气的生成、运移、聚集成藏有着很大的联系,同时也可以从反面论证油气成藏所必须具备的储、盖、保条件,对于油气源的判识也有很大的帮助。从上述分析看,两个采样点五个深度气藏中,I-1 取样点 4 个深度点气藏均为有机煤成气、无机幔源(火山)气与有机、无机非烃气的混源气藏。I-3 取样点气体为有机成因煤成气和部分油型裂解气、无机成因幔源(火山)气与有机、无机成因非烃气的多源气藏。

(1)CO₂、H₂S 等非烃气的有机成因及赋存证明了烃源岩的发育以及油气运移与聚集过程;在盆地勘探初期,相关资料较少情况下对油气成藏研究尤其具有重要指导意义。

(2)非烃气的存在证明具备了形成油气藏的基

本条件。

H₂S 富集需要严格的封存条件,说明储盖组合优越;H₂S 化学性质较烃类气活泼,极易逸散和氧化,保存需要致密盖层、封闭的遮挡断裂体系、地层水不具氧化性质以及不含金属离子等条件。

CO₂、H₂S 的存在,一定条件下(一般认为是高温高压)可以产生溶蚀孔隙,形成较好的储集层^[13,16];瑞宝盆地白垩系-始新统储层致密,沉积相、岩性相及成岩相的综合研究是寻找有利储层的关键。瑞宝盆地火山岩发育,地温梯度高,部分储层段发育溶蚀孔隙,非烃气体的研究为优质储层的判断提供了佐证。

(3)非烃气成因判别是天然气成因判别的重要补充。

(4)天然气成因受烃源、运移、成藏环境多因素影响,单因素判别多存在误差,多因素成因判别更趋准确。

6 结论

(1)瑞宝盆地天然气具有有机成因烃类气与无机成因烃类气、非烃气混源特征;烃类气以 CH₄ 为主,含量为 40.7% ~ 87.9%;非烃气为 N₂、H₂、CO₂、CO 及 H₂S,其中 CO₂ 含量在 3.1% ~ 20.1% 之间, H₂S 含量不低于 0.061%;

(2)适用于瑞宝盆地天然气成因判别方法有天然气组分法、δ¹³C₁ - R₀ 图版、δ¹³Cco₂ - δ¹³C₁ 关系图版;单因子判别存在一定误差,结合二元关系图版判别效果好。

(3)有机成因烃类气主要来源于煤系烃源岩,有机成因非烃气主要来源于煤和干酪根的热解;无机成因烃类气、非烃气主要来源于碳酸盐岩的高温还原作用和火山活动。

(4)油型裂解气的存在推测瑞宝盆地深层可能发育成熟泥岩烃源岩。

(5)非烃气的赋存对烃源岩的演化、油气运移聚集、储层改造以及成藏组合都有积极的地质指向意义。

参考文献:

- [1] 徐永昌. 天然气中氦同位素分布及构造特征[J]. 地学前缘, 1997, 4(3): 185 - 190.
- [2] 徐永昌. 天然气成因理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 13 - 14.

(下转至第 37 页)

因,砂体厚度大、物性好,电测曲线形态以钟形及箱形为主,地震同相轴多表现为中强振幅反射特征;Ⅱ类储层主要为决口扇及废弃河道砂体,砂体厚度薄,物性相对较差,电测曲线形态以指形为主,地震同相轴多表现为弱振幅反射特征。

(2)利用毛细管压力及相渗曲线对研究区明下段油藏的纯油区及油水过渡带的最低闭合高度进行了计算,结果表明Ⅰ类储层纯油区最低闭合高度为3.2 m,油水过渡带发育区闭合高度范围为1.3~3.2 m;Ⅱ类储层纯油区最低闭合高度为17.1 m,油水过渡带发育区的闭合高度为2.6~17.1 m。

(3)利用毛细管压力及相渗曲线预测油水分布涉及大量基础资料,资料越准确可靠,数量越多,储层分类将越精细,应用效果也就越好。

参考文献:

- [1] 曾文冲,欧阳健,何登春.测井地层分析与油气评价[M].北京:石油工业出版社,1987:45-51.
- [2] 孙建孟,陈钢花,杨玉征.低阻油气层评价方法[J].石油学报,1998,19(3):83-88.
- [3] 罗洪飞,丁圣,周备.金湖凹陷闵桥油田低阻油层成因与识别[J].复杂油气藏,2016,9(3):40-44.
- [4] 单祥,季汉成,刘计国,等.尼日尔 Agadem 区块古近系 Sokor1 组低阻油层成因[J].东北石油大学学报,2014,38(2):27-33.
- [5] 齐颖,黎小伟.J油田低阻油层成因的微观机理[J].海洋地质前沿,2014,30(8):42-46.
- [6] 李学慧.苏北盆地低电阻率油层的识别及其分布[J].中国石化大学学报(自然科学版),2008,32(5):1-5.

(上接第6页)

- [3] 史建南,曾治平,周陆扬,等.中国沉积盆地非烃气成因机制研究[J].特种油气藏,2003,10(2):5-10.
- [4] 戴金星,宋岩,戴春森,等.中国东部无机成因气及其成藏形成条件[M].北京:科学出版社,1995:284-291.
- [5] 戴金星,裴锡古,戚厚发.中国天然气地质学[M].北京:石油工业出版社,1992:147-169.
- [6] 宋岩,徐永昌.天然气成因类型及其鉴别[J].石油勘探与开发,2005,32(4):24-29.
- [7] 杨春,刘全有,米敬奎,等.松辽盆地大庆长垣伴生气中二氧化碳成因讨论[J].天然气地球科学,2008,19(2):244-249.
- [8] 戴金星.中国含硫化氢的天然气分布特征、分类及其成因探讨[J].沉积学报,1985,(4):109-120.
- [9] 戴金星,胡见义,贾承造,等.科学安全勘探开发高硫化氢天然气田的建议[J].石油勘探与开发,2004,31(2):1-4.
- [10] 张奎华.川东北地区三叠系飞仙关组高硫化氢气的成因探讨[J].油气地质与采收率,2006,13(2):47-49.
- [11] 江兴福,徐人芬,黄建章.川东地区飞仙关组气藏硫化氢分布特征[J].天然气工业,2002,22(2):24-27.
- [12] 杨家静,王一刚,王兰生,等.四川盆地东部长兴组-飞仙关

- [7] 施冬,张春生,郭甲世.灰色综合评判法在低阻油气层中的应用[J].地球物理学进展,1998,16(1):73-78.
- [8] 李振鹏,贾海松,潘广明,等.歧南断阶带明下段低阻油层地质成因[J].海洋地质前沿,2018,34(11):33-40.
- [9] 李振鹏.歧南断阶带沙一段湖底扇沉积及砂体展布特征[J].特种油气藏,2018,25(5):51-55.
- [10] 李振鹏,黄建廷,曲炳昌,等.渤海海域歧南断阶带明下段河湖交替相沉积[J].科学技术与工程,2018,18(4):255-262.
- [11] 李振鹏,张国坤,汪跃,等.歧南断阶带沙河街组储层特征及物性主控因素[J].断块油气田,2018,5(3):294-299.
- [12] 崔泽宏,夏朝辉,刘玲莉,等.应用毛管压力与相渗曲线研究复杂碳酸盐岩储层生产能力—以土库曼阿姆河右岸M区块气田为例[J].油气地质与采收率,2011,18(1):89-104.
- [13] 唐洪俊,崔凯华.油层物理[M].北京:石油工业出版社,2007:97-221.
- [14] 李振鹏,石鹏,田涛,等.南堡35-2油田馆陶组沉积相识别及储层展布特征[J].石油地质与工程,2017,31(6):45-49.
- [15] 高淑梅,梁长宽,周文革,等.毛管压力相对渗透率曲线在二连地区的应用[J].测井技术,2002,26(1):64-67.
- [16] 张继成,宋考平.相对渗透率特征曲线及其应用[J].石油学报,2008,28(4):104-107.
- [17] 杨胜来,魏俊之.油层物理学[M].北京:石油工业出版社,2006:260-264.
- [18] 杨通佑.石油及天然气储量计算方法[M].北京:石油工业出版社,1987:87-108.
- [19] 田宜灵,肖衍繁,朱红旭,等.高温高压下水与非极性流体间的界面张力[J].物理化学学报,1997,13(1):89-94.
- [20] 严科,赵红兵.断背斜油藏油水界面的差异分布及成因探讨[J].西南石油大学学报(自然科学版),2013,35(1):28-34.

(编辑 杨芝文)

组气藏地球化学特征及气源探讨[J].沉积学报,2002,20(2):349-353.

- [13] 朱光有,张水昌,马永生,等.TSR(H₂S)对石油天然气工业的积极性研究——H₂S的形成过程促进储层次生孔隙的发育[J].地学前沿(中国地质大学(北京);北京大学),2006,13(3):141-149.
- [14] 高先志.利用甲烷碳同位素研究混合气的混合体积[J].沉积学报,1997,15(2):63-65.
- [15] 卢耀如,张凤娥.硫酸盐岩与碳酸盐岩复合岩溶发育机理与工程效应研究[J].中国工程科学,2008,10(4):4-10.
- [16] 郑风云,黄盛波,李早红,等.渤海湾盆地深层潜山储集层中H₂S成因及其地质意义[J].石油勘探与开发,2004,31(4):19-21.
- [17] WORDEN R H, SMALLEY P C, OXTOBY N H. Gas souring by thermochemical sulfate reduction at 140°C; Reply[J]. AAPG Bulletin, 1998, 82(10):1874-1875.
- [18] MACHEL H G. Gas souring by thermochemical sulfate reduction at 140°C; Discussion [J]. AAPG Bulletin, 1998, 82(10):1870-1873.

(编辑 杨芝文)