

塔里木盆地顺南-古城地区奥陶系鹰山组天然气 气源与深层天然气勘探前景

王铁冠¹, 宋到福¹, 李美俊¹, 杨程宇¹, 倪智勇¹, 李慧莉², 曹自成², 张宝收³, 冯子辉⁴

(1. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石化 西北油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011; 3. 中国石油 塔里木油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000; 4. 中国石油 大庆油田有限责任公司 勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163712)

摘要: 顺南-古城地区处于在塔里木盆地顺托果勒低隆起(阿满低隆)、卡塔克隆起(塔中隆起)和古城墟隆起(古城低隆)3个构造单元的汇聚部位。近3年来,在顺南-古城地区的中-下奥陶统鹰山组或中奥陶统一间房组-中、下奥陶统鹰山组(以鹰山组为主)及其毗邻的塔中隆起塔中1号构造下寒武统肖尔布拉克组的碳酸盐岩中,已经有11口探井获得天然气流,天然气产量最高可达 $165.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (顺南5井无阻流量)和 $107.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (古城9井),显示顺南-古城地区丰富的天然气资源潜力。对顺南-古城地区以及塔中1号构造的11口探井的天然气烃类组分与稳定碳同位素组成的气-气对比表明:天然气干燥系数 C_1/C_{1-5} 值达0.99~1.00,属于过成熟干气范畴;天然气碳同位素组成 $\delta^{13}\text{C}_1-\delta^{13}\text{C}_4$ 值均大于-42.5‰,与塔里木盆地台盆区不同源的典型天然气对比,确认天然气源自寒武系气源层。以顺南4井为例,采用流体包裹体测温-单井地层埋藏史数值模拟-实测地层 R_o (镜质体反射率)剖面校正热史的集成技术,厘定中奥陶统一间房组-中、下奥陶统鹰山组(以鹰山组为主)气藏属于一期成藏,天然气充注时间为22~10 Ma(中新世),属于晚期成藏,有利于天然气资源的保存。

关键词: 成藏时间;气源层;鹰山组;深层天然气;顺南-古城地区

中图分类号: TE13 **文献标识码:** A

Natural gas source and deep gas exploration potential of the Ordovician Yingshan Formation in the Shunnan-Gucheng region, Tarim Basin

Wang Tiegua¹, Song Daofu¹, Li Meijun¹, Yang Chengyu¹, Ni Zhiyong¹, Li Huili², Cao Zicheng²,
Zhang Baoshou³, Feng Zihui⁴

(1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2 Research Institute of Petroleum Exploration and Production, SINOPEC Northwest Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 3 Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China; 4 Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina Daqing Oilfield Company Ltd., Daqing, Heilongjiang 163712, China)

Abstract: Shunnan-Gucheng region is located at the convergence of three structural units: Shuntuoguole Low Uplift (Aman low Uplift), Katake Uplift (Tazhong Uplift) and Guchengxu Uplift (Gucheng Low Uplift), in Tarim Basin. In recent years, gas flows have been tested in 11 exploratory wells drilled into the carbonate reservoirs in the Middle-Lower Ordovician Yingshan Fm. or the Middle Ordovician Yijianfang Fm. - Middle-Lower Ordovician Yingshan Fm. (mainly the Yingshan Fm.) in Shunnan-Gucheng region and the Lower Cambrian Xiaerbulake Fm. in the Tazhong No. 1 Structure of the basin. Among the 11 wells, the well Shunnan-5 and Gucheng-9 tested the highest flow rate of $165.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (open flow) and $107.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, respectively, showing great gas potential in Shunnan-Gucheng region. Composition analyses of hydrocarbon and stable carbon isotopes of gas samples from 11 wells in Shunnan-Gucheng region and Tazhong No. 1 Structure indicate an over-matured dry gas, with dry coefficient between 0.99 and 1.00 and carbon isotopic values ($\delta^{13}\text{C}_1 - \delta^{13}\text{C}_4$) bigger than -42.5‰. Correlation with the typical gas samples with different sources in Tarim Basin reveals that the gas in Shunnan-Gucheng region originated from source rocks in the Cambrian. Combining fluid inclusion microthermometry with single well numerical modeling of stratigraphic burial as well as thermal histories and measurement of vitrinite reflectance R_o profile on samples from Well Shunnan-4, we determined that the studied gas reservoirs were typical late-stage gas accumulations with gas-charging occurring during the Miocene (22-10 Ma).

Key words: timing of hydrocarbon accumulation, gas source rock, Yingshan Formation, deep gas, Shunnan-Gucheng region

收稿日期: 2014-11-01。

第一作者简介: 王铁冠(1937—),男,中国科学院院士,有机地球化学和石油地质学。E-mail: wwtgg2003@yahoo.cn。

1 区域地质与天然气勘探概况

顺南-古城地区位于塔里木盆地顺托果勒低隆起(阿满低隆)、卡塔克隆起(塔中隆起)与古城墟隆起(古城低隆)3个构造单元之间的过渡带,处于塔中1号断裂的北侧下降盘部位,包含中国石化的顺托果勒南、卡塔克4区块和中国石油大庆油田塔里木勘探事业部的古城区块(图1)。

在顺南-古城地区,2006年原中石化西北勘探指挥部于古隆1井埋深6 360~6 400 m井段中-下奥陶统鹰山组($O_{1-2}y$)白云岩产天然气 $1.0067 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。近3年来,中国石化西北油田分公司与中国石油大庆油田塔里木勘探事业部合计又有8口深6 000 m以上的探井在中-下奥陶统鹰山组($O_{1-2}y$)或中奥陶统一间房组-中、下奥陶统鹰山组($O_{2y}j-O_{1-2}y$)(以鹰山组为主)的碳酸盐岩中产出天然气,且大多为高产气井,均属于深层天然气范畴。其中,顺南5井无阻流量可达 $165.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,古城9井气产量也达到 $107.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;另有3口探井的气产量在 $(20 \sim 47) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (图1;表1)。

在上述探井中,唯有顺南1井 $O_{2y}j-O_{1-2}y$ 灰岩产天然气 $3.8914 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,并伴生凝析油,气/油比高达 $86723 \text{ m}^3/\text{t}$,按油当量计算,气油比为 70 t/t ;并且在产气层的岩石切片中,显微镜下观测到数以百计的

天然气包裹体和气-水包裹体,但未见油包裹体,表明气藏充注过程中未发生液态石油充注,伴生凝析油是天然气充注途中携带来的油分子所致(表1;图1)。

此外,在毗邻顺南-古城地区的塔中隆起塔中1号构造上,中国石油塔里木油田分公司の中深1和中深1C井分别在埋深6 597.63~6 785.00 m和6 861.00~6 944.00 m井段的深层下寒武统肖尔布拉克组(ϵ_{1x})白云岩中,也产出与顺南-古城地区类型相似的天然气,产量分别为 $3.0322 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $(15 \sim 21.6) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,并且中深1C井有时还伴生少量凝析油,但气油比极低(表1;图1)。在相互毗邻的顺南-古城地区与塔中1号构造,上述一系列天然气高产探井的发现,展现出该地区深层天然气的良好勘探潜力。

本文依据上述11口探井天然气的烃类与稳定碳同位素组成的分析对比研究,试图探讨与判识顺南-古城地区天然气的气源,并集成流体包裹体观测、单井数值模拟以及实测等效镜质体反射率(R_o)3个方法,以顺南4井为例,厘定该区 $O_{2y}j-O_{1-2}y$ (以 $O_{1-2}y$ 为主)碳酸盐岩气藏的成藏时间,进而探讨顺南-古城地区,乃至塔中1号构造深层天然气勘探前景。

2 天然气组成、成因类型与气源对比

在顺南-古城地区9口产气井中总共获得21件

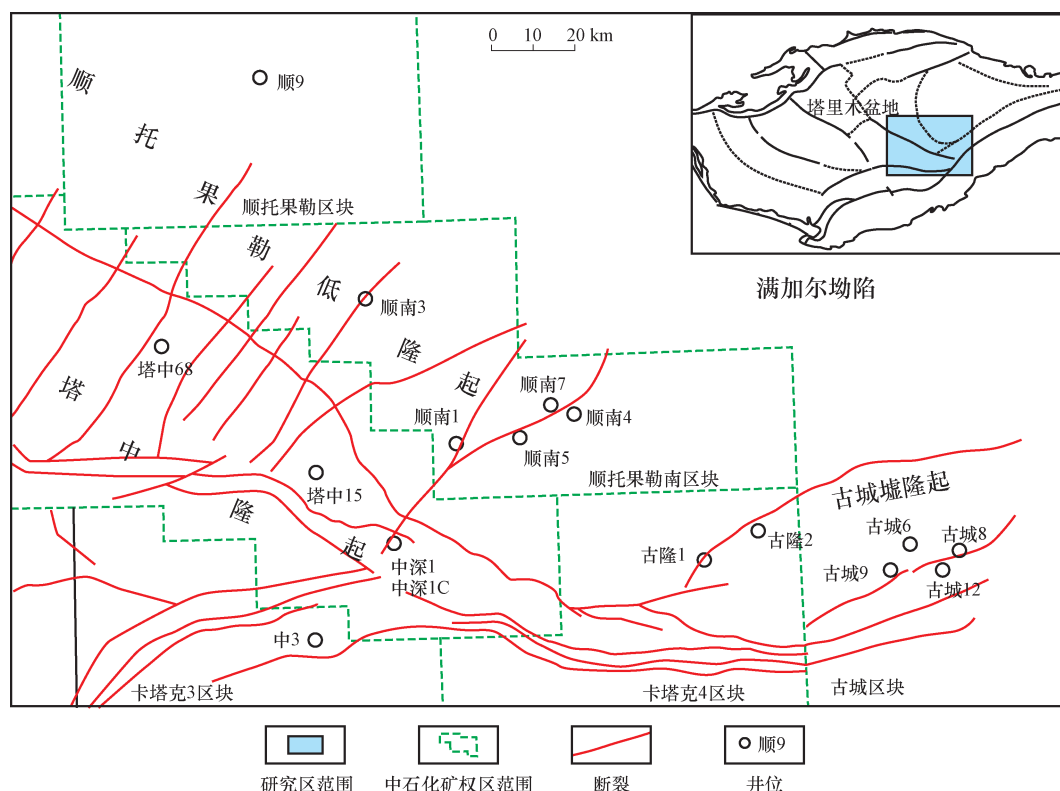


图1 顺南-古城地区及周缘地带探井井位分布

Fig. 1 Exploratory well location in Shunnan-Gucheng area and its surrounding regions

表 1 顺南 - 古城地区与塔中 1 号构造天然气井数据

Table 1 Statistics of gas well data in Shunnan-Gucheng area and Tazhong No.1 Structure

序号	地区	井号	井深/m	产层	产层岩性	天然气产量/ (10 ⁴ m ³ · d ⁻¹)	采样方式	备注	测试/采样日期
1	顺南	顺南 1	6 528.24 ~ 6 690.00	O ₂ yj - O ₁₋₂ y	灰岩	3.891 4	气袋样	气/油比 86 723m ³ /t, 酸压完井作业	2011. 12
2		顺南 4	6 299.90 ~ 6 681.80			40		酸压完井作业	2013. 7
3		顺南 5	7 176.50 ~ 7 209.80	O ₁₋₂ y		121.0 ~ 165.8	钢瓶样	井口无阻流量, 未经酸化处理	2013. 9
4		顺南 7	6 367.64 ~ 6 651.60	O ₂ yj - O ₁₋₂ y		5.6 ~ 8.6		未经酸化处理	2014. 9
5	古城	古隆 1	6 360.00 ~ 6 400.00	O ₁₋₂ y	白云岩	1.006 7	气袋样	酸压完井作业	2006
6		古城 6	6 144.00 ~ 6 169.00			26	钢瓶样	未经酸化处理	2012. 5
7		古城 8	6 070.20 ~ 6 080.60			47.84		酸化完井作业	2013. 9
8		古城 9	5 990.80 ~ 6 116.40			107.8			2014. 8
9		古城 12	6 200.00 ~ 6 230.00			待测试	—	未经酸化处理, 井口气样	2014. 8
10	中深 1 号构造	中深 1	6 597.63 ~ 6 785.00	Є _{1x}		3.032 2	钢瓶样	—	2012. 10
11		中深 1C	6 861.00 ~ 6 944.00			15.0 ~ 21.6		含少量凝析油, 酸压完井作业	2013. 7

深层天然气样以及塔中 1 号构造中深 1 和中深 1C 井 6 件深层气样的烃类与非烃组分的分析数据(表 2, 表 3)。

2.1 烃类气体组成

顺南 - 古城地区中 - 下奥陶统鹰山组(O₁₋₂y)与中奥陶统一间房组(O₂yj)(主要是鹰山组)的天然气烃类组成以甲烷居绝对优势,一般含量为 73.2%(古隆 1 井)~98.3%(古城 12 井),且含微量 C₂₊重烃,含量只有 0.11%(顺南 5 井)~0.76%(古隆 1 井);烃类气体的组成明显偏干,干燥系数达 0.99~1.00,呈现典型的过成熟干气属性^[1](表 1,表 2)。

唯有顺南 1 井由于含少量伴生凝析油,烃类气体组成相对偏湿,甲烷含量为 80.8%,乙烷与丙烷含量分别占 2.06%和 1.18%,C₂₊重烃含量可达 5.72%;但干燥系数保持在 0.95,仍然属于过成熟临界干气范畴(表 1,表 2)。

塔中 1 号构造中深 1 和中深 1C 井下寒武统肖尔布拉克组(Є_{1x})天然气烃类组成,甲烷含量为 78.3%(中深 1 井)和 62.7%(中深 1C 井),C₂₊重烃含量占 0.79%(中深 1 井)和 1.00%(中深 1C 井),干燥系数均为 0.99,也属于过成熟干气范畴。它们与顺南 - 古城地区天然气井 O₁₋₂y 与 O₂yj 的天然气烃类组分特征别无二致,表明二者的烃源与成熟度的一致性(表 1,表 3)。

2.2 烃类气体碳同位素组成

由于顺南 - 古城地区 9 口探井以 O₁₋₂y 为主的深

层干气 C₂₊重烃含量均明显偏低(表 2),以致烃类气体组分稳定碳同位素分析只检测到 16 件气样的甲烷稳定碳同位素值(δ¹³C₁)、10 件气样的乙烷稳定碳同位素值(δ¹³C₂)、4 件气样的丙烷稳定碳同位素值(δ¹³C₃)以及 1 件气样的丁烷稳定碳同位素值(δ¹³C₄),合计获得 31 个 δ¹³C 值分析数据(表 4)。这些数据展现出碳同位素组成普遍偏重的特征,δ¹³C 值分布于 -39.1‰~-22.8‰,即全部大于 -42.5‰,据此可进一步确认顺南 - 古城地区 9 口探井以 O₁₋₂y 为主的深层烃类气体的同源性。

此外,只有顺南 1 井连续地检测到 δ¹³C₁—δ¹³C₄ 值,分布于 -38.3‰~-22.8‰,且呈现出典型有机成因烃类气体的正序分布特征,即 δ¹³C₁<δ¹³C₂<δ¹³C₃<δ¹³C₄(表 4 序号 1)^[2]。

塔中 1 号构造中深 1 和中深 1C 井共有 4 件Є_{1x}天然气样,检测到 4 件气样的甲烷 δ¹³C₁ 值、3 件气样的乙烷 δ¹³C₂ 值、1 件气样的丙烷 δ¹³C₃ 值与 1 件气样的丁烷 δ¹³C₄ 值,合计获得 9 个 δ¹³C 值分析数据。这些数据同样展现出碳同位素组成偏重的特征,δ¹³C 值分布于 -42.1‰~-30.0‰(均 ≥ -42.5‰),其中只有 δ¹³C₁ 值临界于 -42.5‰(表 4);仅有 1 件气样连续地检测到 δ¹³C₁—δ¹³C₄ 值,分布于 -42.1‰~-30.0‰,呈现出典型的 δ¹³C₁<δ¹³C₂<δ¹³C₃<δ¹³C₄ 正序分布特征(表 4 序号 17),同样指示有机烃类气体成因标志^[2]。

2.3 烃类气体气 - 源对比

图 2a,b 分别展示上述顺南 - 古城地区与塔中 1

表 2 顺南-古城地区天然气组成

Table 2 Gas composition in Shunnan-Gucheng area

序号	区块	井号	井深/m	层位	烃类组分含量/%							干燥系数 (C ₁ /C ₁₋₅)	非烃组分含量/%				非烃总量/ %	天然气类型
					C ₁	C ₂	C ₃	iC ₄	nC ₄	C ₂₊	总烃		O ₂	CO ₂	N ₂	H ₂ S		
1	顺南	顺南 1	6 528.24 ~ 6 690.00	O ₁₋₂ y - O ₂ zj	80.8	2.06	1.18	0.42	0.49	5.72	85.7	0.95	0	12.0	1.68	—	13.70	临界干气
2		顺南 4	6 299.90 ~ 6 681.80		83.3	0.65	—	—	—	0.65	84.0	0.99	0.66	10.0	5.35	—	16.00	
3					83.2	0.64	—	—	0.01	0.65	83.8	0.99	0.61	10.4	5.16	—	16.20	
4					82.9	0.64	—	—	0.01	0.65	83.5	0.99	0.57	10.9	5.08	—	16.50	
5				顺南 5	7 176.50 ~ 7 209.80	O ₁₋₂ y	93.5	0.11	—	—	—	0.11	93.6	1.00	0.40	3.37	1.95	
6		94.4	0.12				—	—	—	0.12	94.5	1.00	0.22	3.36	1.32	—	4.90	
7		93.5	0.11				—	—	—	0.11	93.6	1.00	0.38	3.34	2.07	—	5.80	
8		顺南 7	6 367.64 ~ 6 651.60	O ₁₋₂ y - O ₂ zj	93.4	0.22	—	—	—	—	93.58	0.99	—	5.98	0.28	—	6.26	
9	古城	古隆 1	6 360.00 ~ 6 400.00	O ₁₋₂ y	73.2	0.68	0.08	0	0	0.76	74.0	0.99	0.24	22.2	3.21	—	25.70	
10		古城 6	6 144.00 ~ 6 169.00		90.7	0.25	0.02	0.01	0.01	0.29	91.0	1.00	—	4.71	4.26	—	8.97	
11					90.9	0.25	0.02	—	—	0.27	91.2	1.00	—	5.59	4.26	—	9.85	
12					91.4	0.25	0.02	—	—	0.27	91.7	1.00	—	4.46	3.91	—	8.37	
13					89.4	0.25	0.02	—	—	0.27	89.7	1.00	—	5.20	4.65	—	9.85	
14					83.4	0.31	0.02	—	—	0.40	83.8	1.00	—	11.50	4.50	—	16.00	
15		古城 8	6 070.20 ~ 6 080.60		83.4	0.31	0.02	—	—	0.48	83.9	0.99	—	11.50	4.51	—	15.70	
16					81.9	0.43	0.02	—	—	0.50	82.4	0.99	—	12.30	5.07	—	17.40	
17					82.9	0.34	0.02	0.02	—	0.38	83.3	1.00	—	11.90	4.60	—	16.50	
18					古城 9	5 990.80 ~ 6 116.40	71.6	0.21	0.01	—	—	0.22	71.8	1.00	—	25.70	2.30	0.02
19		65.6	0.22				0.005	—	—	0.23	65.8	1.00	—	29.10	4.77	—	33.90	
20		古城 12	5 990.80 ~ 6 116.40		98.3	0.48	0.02	—	—	0.50	98.8	1.00	—	0.06	0.97	0.07	1.10	
21	97.9				0.53	0.02	—	—	0.55	98.5	1.00	—	0.006	1.40	—	1.41		

注:分析单位 1—8 为中国石油大学(北京);9,19,21 为中科院兰州油气研究中心;10—17 为塔里木油田勘探开发研究院;18,20 为大庆油田勘探开发研究院。

表 3 塔中 1 号构造中深 1 和中深 1C 井天然气组成

Table 3 Gas composition of Zhongshen-1 & Zhongshen-1C wells in Tazhong No.1 Structure

序号	区块	井号	井深/m	层位	烃类组分含量/%							干燥 系数 (C ₁ /C ₁₋₅)	非烃组分含量/%			非烃 总量/ %	天然气 类型
					C ₁	C ₂	C ₃	iC ₄	nC ₄	C ₂₊	总烃		O ₂	CO ₂	N ₂		
1	塔中隆起 塔中 1 号 构造	中深 1	6 597.53 ~ 6 835.00 (完测,未酸压)	ε _{1x}	78.3	0.50	0.14	0.05	0.07	0.79	79.1	0.99	—	14.4	2.55	20.9	干气
2					77.1	0.47	0.14	0.06	0.07	0.79	79.1	0.99	—	14.4	2.55	20.9	
3					77.7	0.51	0.16	0.06	0.08	0.92	78.6	0.99	—	15.1	2.51	21.4	
4		中深 1C	6 861.00 ~ 6 944.00 (酸压)		62.7	0.50	0.16	0.05	0.08	1.00	63.7	0.99	—	24.2	4.00	28.2	
5					62.7	0.51	0.16	0.05	0.08	0.90	63.6	0.99	—	24.1	4.00	28.1	
6					69.0	0.55	0.18	0.06	0.09	0.97	70.1	0.99	—	25.7	3.90	29.6	

注:分析单位为中国石油大学(北京)。

号构造 11 口探井 20 件烃类气样稳定碳同位素组成 δ¹³C₁—δ¹³C₄ 值(或 δ¹³C₁—δ¹³C₅ 值)的分布曲线,二者的碳同位素组成均偏重,其 δ¹³C₁—δ¹³C₅ 值曲线全部分布于 δ¹³C 值 -42.5‰ 之上。图 2c,d 则分别是塔里木盆地台盆区典型奥陶系气源的成熟-高成熟湿气(包含顺 7,顺西 1,YJ1X,YJ2X,TZ4,TZ45,TZ47,YB1-3,YB1-5 和 YB1-2C 井的天然气,图 2c)以及

典型寒武系气源过成熟干气(包含 TS1,BT5,TZ62,T913,TK902,TK917 和 TK918 井的天然气,图 2d)。

由图 2 可见,奥陶系气源成熟-高成熟湿气的 δ¹³C₁—δ¹³C₅ 值分布曲线以甲烷 δ¹³C₁ 值显著偏轻(< -42.5‰),δ¹³C₁—δ¹³C₅ 值分布曲线的斜率偏陡为特征,寒武系气源过成熟干气的 δ¹³C₁—δ¹³C₅ 值分布曲线以甲烷 δ¹³C₁ 值显著偏重(≥ -42.5‰),δ¹³C₁—δ¹³C₅

表 4 顺南 - 古城地区及塔中 1 号构造天然气稳定碳同位素组成

Table 4 Stable carbon isotopic composition in Shunnan-Gucheng area and Tazhong No. 1 Structure

序号	区块	井号	井深/m	层位	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$					气源判识
					C _{CH4}	C ₂	C ₃	nC ₄	CO ₂	
1	顺南	顺南 1	6 528.24 ~ 6 690.00	O ₁₋₂ y - O ₂ yj	-38.3	-27.3	-23.8	-22.8	—	寒武系 过成熟干气
2		顺南 4	6 299.90 ~ 6 681.80		-37.8	-32.4	—	—	—	
3					-37.8	-32.6	—	—	—	
4					-37.5	-32.2	—	—	—	
5				顺南 5	7 176.50 ~ 7 209.80	O ₁₋₂ y	-37.1	—	—	
6		-36.8	—				—	—	—	
7		-36.8	—				—	—	—	
8		顺南 7	6 367.64 ~ 6 651.60	O ₁₋₂ y - O ₂ yj	-37.5	-27.4	—	—	—	
9	古城	古隆 1	6 360.00 ~ 6 400.00	O ₁₋₂ y	-38.5	—	—	—	—	
10		古城 6	6 144.00 ~ 6 169.00		-33.6	-37.6	-34.9	—	—	
11		古城 8	6 070.20 ~ 6 080.60		-34.8	-38.7	—	—	—	
12					-35.1	—	—	—	—	
13		古城 9	5 990.80 ~ 6 116.40		-34.6	-32.9	-31.3	—	-1.35	
14					-33.9	—	—	—	-2.60	
15		古城 12	5 990.80 ~ 6 116.40		-39.1	-31.1	-34.5	—	—	
16					-36.2	-36.2	—	—	—	
17	塔中 1 号 构造	中深 1	6 597.53 ~ 6 835.00	Є ₁ x	-42.1	-35.0	-31.9	-30.0	—	
18		中深 1C	6 861.00 ~ 6 944.00		-40.6	—	—	—	—	
19					-41.4	-34.8	—	—	—	
20					-41.6	-34.9	—	—	—	

注:分析单位 1—8,17—20 为中国石油大学(北京);9,14,16 为中科院兰州油气研究中心;13,15 为大庆油田勘探开发研究院。

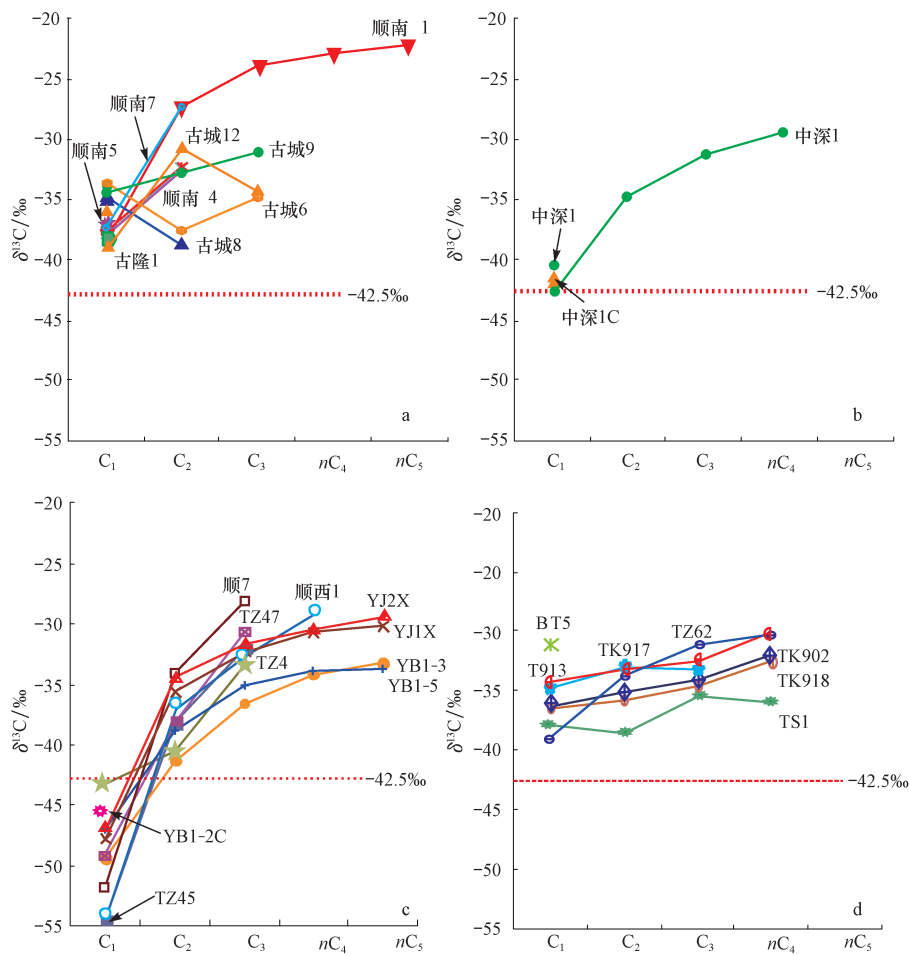


图 2 顺南 - 古城地区及塔中 1 号构造烃类气体稳定碳同位素值($\delta^{13}\text{C}$)分布曲线对比

Fig. 2 Stable carbon isotopic($\delta^{13}\text{C}$)distribution and correlation of gas samples in Shunnan-Gucheng area and Tazhong No. 1 Structure

a. 顺南 - 古城过成熟干气;b. 中深 1 和中深 C 井过成熟干气;c. 奥陶系气源成熟 - 高成熟湿气;d. 寒武系气源过成熟干气

值分布曲线的斜率平缓为标志,二者均以 $\delta^{13}\text{C}$ 值 -42.5‰ 为临界值(图 2c,d)。显然,在图 2a,b 中的顺南-古城地区与塔中 1 号构造 11 口探井以 O_{1-2}y 为主的天然气 $\delta^{13}\text{C}_1-\delta^{13}\text{C}_5$ 值曲线均与图 2c 奥陶系气源的成熟-高成熟湿气不具有可比性,而与图 2d 的天然气 $\delta^{13}\text{C}_1-\delta^{13}\text{C}_5$ 值分布曲线一致,因此理应属于典型寒武系气源过成熟干气范畴。

2.4 非烃气体组成与成因类型

顺南-古城地区产层以 O_{1-2}y 为主,天然气非烃组成经常受气样采集方式与完井测试作业方式的影响。气袋采集的天然气样极易混入大气的 N_2 和 O_2 成分;采用酸压完井作业的油气井,在短时间内人工注入大量高浓度强酸,与碳酸盐岩地层快速反应,生成大量 CO_2 气体,从而导致采集的天然气样中 CO_2 含量与非烃总量的倍增^[3]。因此,采用钢瓶采样,且未经酸压作业的天然气井,其非烃气体检测结果能更真实地反映地下天然气的非烃组成。

顺南 5、顺南 7、古城 6 和古城 12 井采集天然气样时未实施酸化作业,其中顺南 7 井采集井口气显示样,其余 3 口井均为钢瓶采样(表 1)。这 4 口井的天然气样中,非烃总量不高,大都在 1.41% (古城 12 井)~ 6.26% (顺南 7 井), CO_2 含量占 0.006% ~ 5.98% , N_2 含量占 1.40% ~ 4.65% ,基本上可以反映该地区天然气的实际非烃组成;唯有顺南 5 井天然气含微量 O_2 (0.22% ~ 0.40%),但非烃总量仍为 4.9% ~ 5.8% ,怀疑 O_2 是由现场采样或室内操作时的空气混入所致。

顺南 1、顺南 4 和古隆 1 井均采用气袋样,天然气样中有大气成分混入,非烃气体中 N_2 占 1.68% ~ 5.08% , O_2 占 0.24% ~ 0.66% (表 1,表 2)。

研究表明,完井酸化压裂作业可导致井下地层中 CO_2 含量大幅度增加,从而引起非烃气体总量剧增,但不会影响到 N_2 和 H_2S 等气体含量以及烃类组分的干燥系数^[3]。顺南 1 和顺南 4 井与古城 8、古城 9、古隆 1 井以及中深 1 和中深 1C 井天然气采样方式有别,前者为气袋采样,后者为钢瓶采样,但二者完井测试前都经酸压工艺处理,非烃气体以 CO_2 为主,含量高达 10.0% ~ 29.1% ,非烃总量也增至 13.7% ~ 33.6% (表 1,表 2),明显反映碳酸盐岩地层受酸化处理的影响。

塔中 1 号构造中深 1 和中深 1C 井天然气均为钢瓶气样,其非烃气体组成中, N_2 含量仅为 2.51% ~ 3.90% ,大气成分混入的迹象不明显。但是,二者的非烃气体组成有明显差异。中深 1 井 C_{1-x} 完井测试未经酸压作业,非烃总量为 20.9% ~ 21.4% ,其中 CO_2 含量占 14.4% ~ 15.1% , N_2 含量占 2.51% ~ 2.55% ,即非烃气体的组成与顺南-古城地区以鹰山组为主的天然

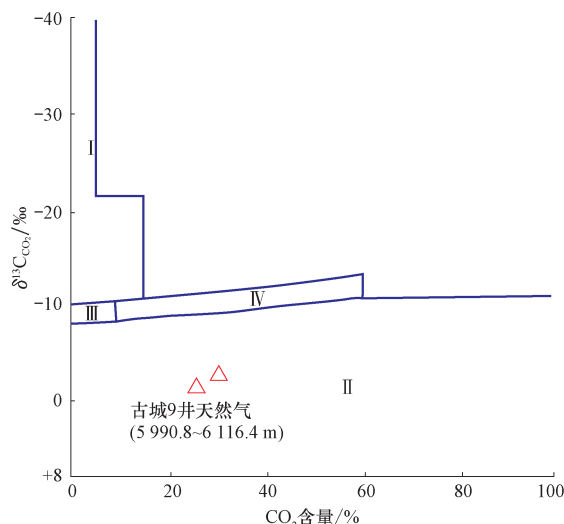


图3 有机与无机成因二氧化碳稳定碳同位素-含量($\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}-\text{CO}_2$)鉴别图版

Fig. 3 Chart board of CO_2 stable carbon isotope- CO_2 content ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}-\text{CO}_2$) for distinguishing organic and inorganic genetic CO_2
I. 有机成因二氧化碳区; II. 无机成因二氧化碳区; III. 有机与无机成因二氧化碳共存区; IV. 有机与无机成因二氧化碳混合气区

气基本一致;而经受完井酸压作业的中深 1C 井 C_{1-x} 天然气的 CO_2 含量 (24.1% ~ 25.7%) 平均增加 1.65 倍, N_2 含量 (3.9% ~ 4.0%) 也有增加约 1.6 倍,非烃总量达 28.1% ~ 29.6% ,同样增加 1.3~1.4 倍(表 3),反映酸化作业对非烃组分的贡献^[3]。

天然气的同位素组成是识别 CO_2 成因与来源的重要依据。戴金星等提出,有机质经生物化学、热解和裂解作用形成的有机成因 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值均小于 -10‰ ,而源自地幔、岩浆-火山以及碳酸盐岩高温分解或变质作用形成的无机成因 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值则大于 -8‰ ,并构建了有机与无机成因 CO_2 的稳定碳同位素-含量($\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}-\text{CO}_2$)鉴别图版(图 3)^[4];张宝收等的研究确认,人工酸压作业注入地层的强酸与碳酸盐岩作用生成的 CO_2 属于一类无机成因的新类型^[3]。以上述古城 9 井经酸压完井作业后采集的钢瓶气样为例,其 CO_2 含量高达 25.7% ~ 29.1% (表 2), $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值明显大于 -8‰ ,达 -1.35‰ ~ -2.60‰ (表 4);在 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}(\text{‰})-\text{CO}_2(\%)$ 鉴别图版(图 3)上,古城 9 井 CO_2 标定于 II 区——“无机成因二氧化碳区”,因此属于典型的无机成因范畴。

3 天然气充注期次与成藏时间的厘定

本文以顺托果勒南区块的顺南 4 井为例(图 1),采用流体包裹体测温、重建单井地层埋藏史数值模拟和实测地层 R_o 剖面校正热史的集成技术,厘定顺南地区产层以 O_{1-2}y 为主的天然气藏的充注成藏时间。

3.1 流体包裹体产状

由于顺南4井 $O_{1-2}y$ 取心收获率太低,仅采集到该井埋深6 361.13~6 362.52 m井段 $O_{2}y$ 产层的7件岩心样,进行流体包裹体观测。产气层岩性为颗粒灰岩,主要由细粒灰质砂屑及少量生物碎屑组成,偶见鲕粒及球粒,粒间充填亮晶方解石以及少量微晶、泥晶胶结物;常见相互穿插的方解石脉与缝合线,含有方解石

或泥质填隙物,呈全充填-半充填状,缝合线附近常见白云石颗粒(图4)。方解石胶结物和方解石脉的微裂隙中集中发育气包裹体和气-水包裹体(气液比小于10%),个别包裹体发微弱的黄色荧光。

在亮晶方解石、方解石胶结物以及白云石中均可见流体包裹体,常沿宿主矿物的微裂隙集中出现,呈不同方向的条带状分布,个别相互交切的包裹体条带呈现共轭裂隙的分布特征,属于同期产物(图5a,b)。包

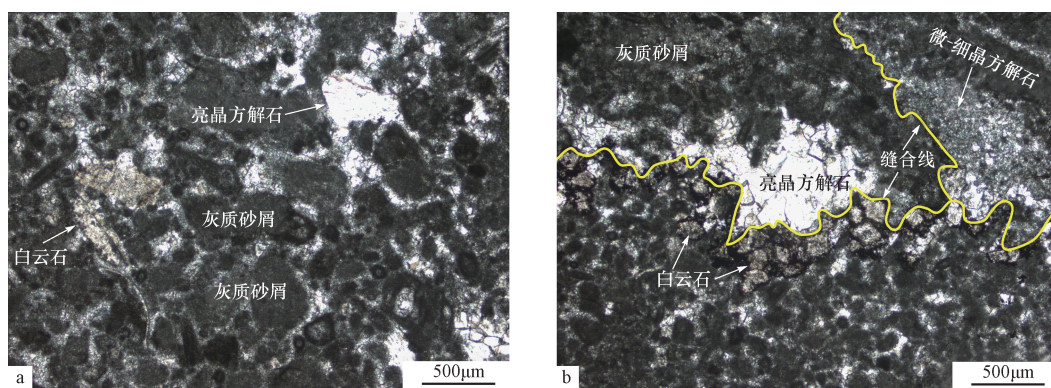


图4 顺南-古城地区顺南4井埋深6 361.13~6 362.52 m井段中奥陶统一间房组颗粒灰岩产状

Fig. 4 Occurrence of grainstone from the Well Shunnan-4(6 361.13 - 6 362.52 m) in the Middle Ordovician Yijianfang Formation in Shuannan-Gucheng area

a. 灰质砂屑颗粒及其亮晶方解石胶结物;b. 缝合线及其周边的白云石和亮晶方解石

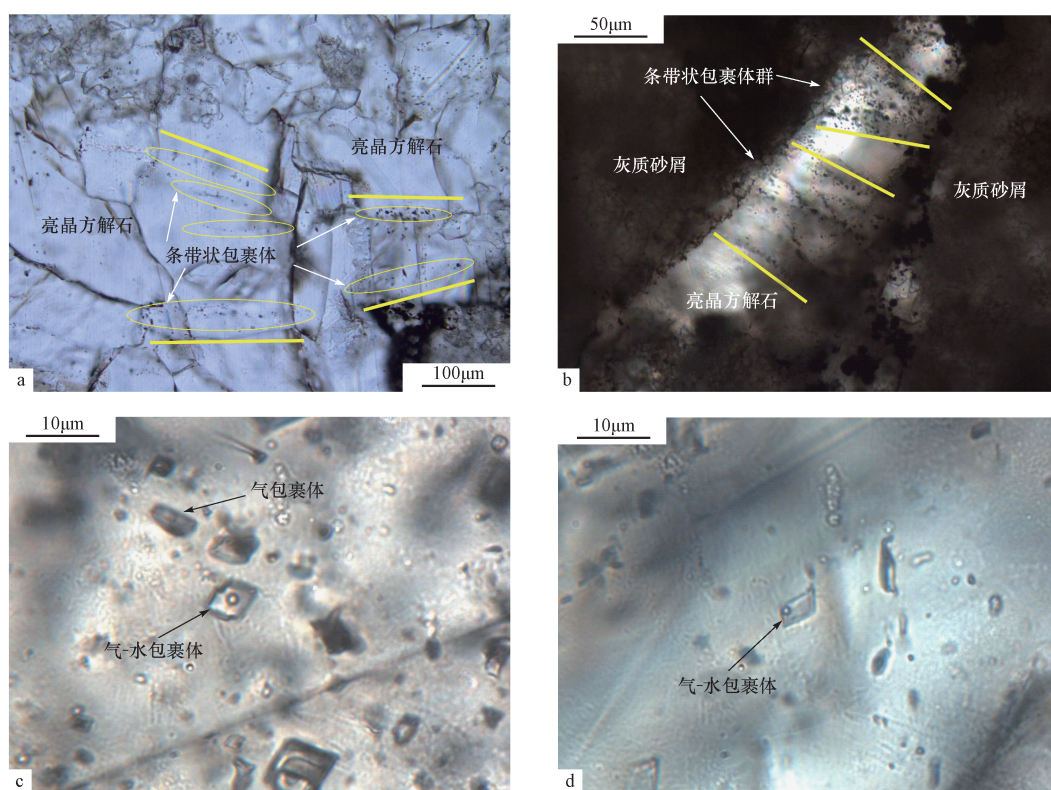


图5 顺南-古城地区顺南4井埋深6 361.13~6 362.52 m井段中奥陶统一间房组颗粒灰岩流体包裹体产状

Fig. 5 Fluid inclusion occurrence of grainstone from the Well Shunnan-4(6 361.13 - 6 362.52 m)

in the Middle Ordovician Yijianfang Formation in Shunnan-Gucheng area

a:亮晶方解石中包裹体呈条带状分布;b:亮晶方解石填隙物中沿微裂隙分布的包裹体;c:气包裹体与气-水包裹体;d:气-水包裹体

裹体类型主要为气包裹体以及气-水包裹体,未见明显的油包裹体(图5c,d)。包裹体的产状观察结果,确认为发育一期共生的气包裹体与气-水包裹体。

3.2 流体包裹体测温

在顺南4井埋深6 361.13~6 362.52 m井段 $O_{1-2}y$ 颗粒灰岩产气层的自生矿物中,选择与气包裹体共生的气-水包裹体,进行均一温度和冰点测温。均一温度测温总共观测到96个包裹体数据,在均一温度分布直方图上,分布主频为170~180℃,呈现出单峰型正态分布特征,显示天然气一期充注成藏的标志,并且将上述主频温度作为气包裹体的捕集温度,即近似的天然气充注成藏温度(图6)。

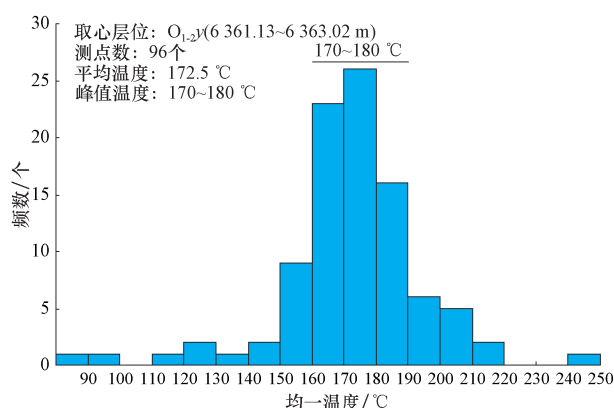


图6 顺南-古城地区顺南4井中-下奥陶统
鹰山组颗粒灰岩流体包裹体均一温度直方图

Fig. 6 Homogenization temperature histogram of fluid inclusions in grainstone from the Well Shunnan-4 in the Middle-Lower Ordovician Yingshan Formation in Shunnan-Gucheng area

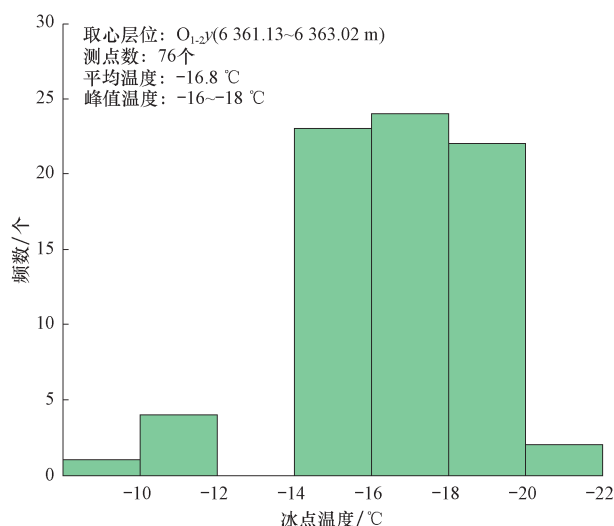


图7 顺南-古城地区顺南4井中-下奥陶统
鹰山组颗粒灰岩流体包裹体冰点直方图

Fig. 7 Ice point histogram of fluid inclusions in grainstone from the Well Shunnan-4 in the Middle-Lower Ordovician Yingshan Formation in Shunnan-Gucheng area

冰点测温总共获得76个包裹体数据,冰点分布直方图的分布主频在-18~-16℃区间,同样呈现单峰型正态分布特征,这不仅进一步验证均一温度所厘定的天然气一期充注特征,而且根据Hall等(1988)建立的盐水包裹体冰点与NaCl-KCl-H₂O溶液含盐度的换算关系: $W = 0.00 + 1.78 T_m - 0.044 2 T_m^2 + 0.000 557 T_m^3$ (W 为含盐度; T_m 为冰点)^[5],折算地层水盐度为21.6%~20.2%,表明其含盐度较为均匀(图7)。

3.3 重建单井地层埋藏史-热史

顺南4井位于顺托果勒南区块,其构造部位处于顺托果勒低隆起的东南部,东侧毗邻古城墟隆起,南侧以塔中I号断裂与塔中隆起分界,即处于塔中I号断裂的北侧下降盘部位(图1)。该地区是由寒武纪一中奥陶世克拉通坳陷内的碳酸盐台地,经加里东期和海西期多期构造运动,发育了寒武系-白垩系,以及古近系、新近系和第四系沉积地层,其间区域性地缺失侏罗纪地层。

顺南4井揭露的地层层序为: $O_{1-2}y$ (中-下奥陶统鹰山组)厚191 m(未穿), O_2y (中奥陶统一间房组)171 m, O_3qr (上奥陶统恰尔巴克组)25 m, O_3l (上奥陶统良里塔格组)111 m, O_3s (上奥陶统桑塔木组)厚达2 530 m,中-下石炭统厚约600 m,二叠系384 m,三叠系538 m,白垩系厚407 m,新生界厚约1 700 m。层序中,缺失整个志留系和泥盆系,中石炭统与三叠系之间仅有384 m厚的中-下二叠统碎屑岩段,不发育二叠系玄武岩段,侏罗系完全缺失。

顺南4井主要的地层不整合面是 C_1b (下石炭统巴楚组)/ O_3s (上奥陶统桑塔木组)不整合面。该不整合面实际上是由3期不整合面叠合而成。 C_1b 直接覆盖在 O_3s 之上,构成一个地层剥蚀厚度为最大的叠合不整合面,也是重建该井地层埋藏史-热史的关键性不整合面。从区域构造演化来看,奥陶纪末期加里东运动是塔里木盆地重要的构造运动之一。该运动使得下伏奥陶系遭受强烈剥蚀[S_1k (下志留统柯坪塔格组)/ O_3 (上奥陶统)]在塔中和塔东隆起剥蚀量较大,但南、北两侧剥蚀量迅速减小。顺南4井残余2 530 m厚 O_3s ,所以该期构造运动造成顺南4井上奥陶统地层剥蚀量很小。志留系是广泛发育在奥陶纪剥蚀夷平基础上的一套海相沉积^[6]。志留纪末,加里东末期构造运动导致 $D_{1-2}k$ (中-下泥盆统克孜尔塔格组)/ S (志留系)不整合面,以致在塔北隆起主体区普遍缺失整套志留系,并与 S_1k/O_3 不整合面相叠合,在塔中隆起围斜区的中1和顺1井等仍保留较为完整的志留系,而在顺南-古城地区顺南3井的志留系残余厚度

约有800 m。海西早期构造运动造成大范围的C(石炭系)/D₁₋₂k(中-下泥盆统克孜尔塔格组)不整合面,但地层剥蚀量较小。本节重建顺南4井单井地层埋藏史,选取C₁b/O₃s不整合面地层剥蚀厚度800 m。张一伟等(2001)推算,顺南-古城地区其他各地层不整合面的剥蚀厚度均不大^[7],据此本节模拟选取其剥蚀厚度为100~200 m。

依据区域构造和沉积层序确定大地热流值。考虑到顺南4井巨厚的上奥陶统沉积总厚度达到2 666 m,导致早志留世时期O₁₋₂y的埋藏深度就超过了3 000 m,以致古地温超过100 ℃。并且,二叠系玄武岩不发育,该时期火山活动的热效应相对较弱,对大地热流值的影响也不明显。与塔中和塔北隆起相比,顺南地区的大地热流值变化相对平稳。据此,采用BasinMod 1D盆地模拟软件,重建单井地层埋藏史-热史时,选取的古生代大地热流值低于塔中和塔北隆起(图8)。

3.4 成藏期次与时间厘定

为了检验重建顺南4井地层埋藏史-热史的可靠性,基于图8埋藏史-热史的运用EasyR_o软件,求得顺南4井单井地层模拟计算的镜质体反射率R_o剖面。同时,建立单井地层的实测镜质体反射率R_o值,通过适当调整古地温与地层剥蚀厚度,力求使模拟计算的R_o剖面与实测R_o值拟合(图9),可以得出一个符合顺南4井地质背景的单井埋藏史-热史。在此单井埋藏

史-热史基础上,可将O₂yy产气层达到充注成藏温度(即均一温度主频)170~180 ℃,转换为天然气的充注成藏时间,即成藏时间为22~10 Ma(中新世),属于晚期成藏范畴(图8)。

4 结论

1) 顺南-古城地区处于在塔里木盆地顺托果勒低隆起(阿满低隆)、卡塔克隆起(塔中隆起)和古城墟隆起(古城低隆)3个构造单元的汇聚部位。迄今为止,顺南古城地区O₁₋₂y或O₂yy-O₁₋₂y(以鹰山组为主),及其毗邻的塔中隆起塔中1号构造C₁x的碳酸盐岩中,已经有11口探井在埋深6 000~7 200 m井段获得天然气流,天然气产量最高可达165.8×10⁴ m³/d(顺南5井无阻流量)和107.8×10⁴ m³/d(古城9井),另有3口探井的气产量在(20~47)×10⁴ m³/d,显示顺南-古城地区丰富的天然气资源潜力。

2) 依据天然气烃类组成及其稳定碳同位素值(δ¹³C)分布曲线特征两类指标,与塔里木盆地不同气源天然气进行气-气对比的结果表明:顺南-古城地区以O₁₋₂y为主的下奥陶统天然气,以及塔中1号构造中深1和中深1C井C₁x的天然气,均属于过成熟-临界过成熟的干气,气源均来自寒武系烃源层。

3) 集成流体包裹体观测、单井数值模拟和实测等效镜质体反射率(R_o)3个方法,以顺南4井为例,厘定顺南-古城地区O₂yy-O₁₋₂y(以O₁₋₂y为主)的碳酸

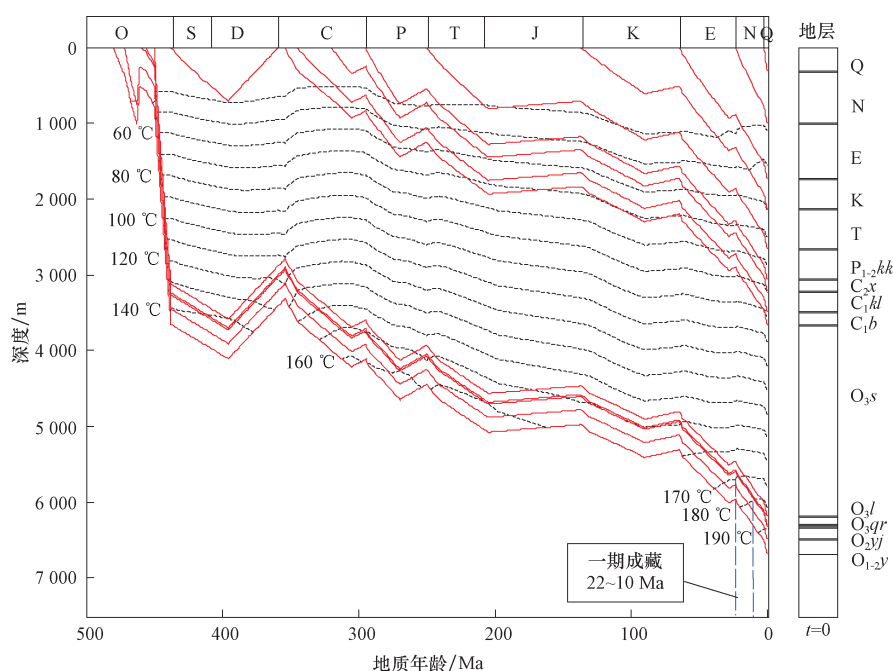


图8 顺南-古城地区顺南4井地层埋藏史-热史与中奥陶统一间房组-中、下奥陶统鹰山组气藏成藏时间的厘定

Fig. 8 Stratigraphic burial-thermal history of the Well Shunnan-4 and gas-charging timing of the Middle Ordovician Yijianfang Formation and the Middle-Lower Ordovician Yingshan Formation gas reservoirs

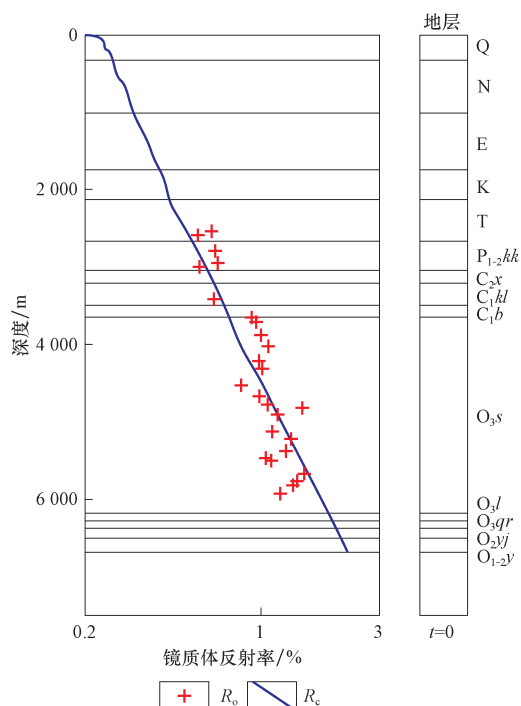


图9 顺南-古城地区顺南4井镜质体反射率实测值(R_o)与模拟计算值(R_c 曲线)拟合校正埋藏史-热史

Fig. 9 Stratigraphic burial-thermal history of the Well Shunnan-4 after correction through fitting of simulated vitrinite reflectance R_c profile with measured vitrinite reflectance R_o values

盐岩气藏成藏时间为22~10 Ma(中新世),属于晚期天然气一期充注成藏的范畴,晚、近时期成藏有利于规模性天然气资源的保存。

4) 在顺南-古城地区现仍有顺南1和古隆1井下奥陶统仅获得 $(1 \sim 3.8) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 天然气产量的低产井,甚至古隆2井只见显示而未获得产量,究其主要原因在于储层与保存条件差,并非天然气资源问题。

5) 可以预期,顺南-古城地区深层下奥陶统是一个具有良好的天然气勘探前景的有利地区,寒武系烃

源层可提供丰富的气源,关键要落实天然气的储集、圈闭与保存条件,可望取得天然气勘探的重大突破。

参 考 文 献

- [1] 戴金星,戚厚发,郝石生,等. 天然气地质学概论[M]. 北京:石油工业出版社,1985:1-203.
Dai Jinxing, Qi Houfa, Hao Shisheng, et al. An introduction to natural gas geology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1985: 1-203.
- [2] 戴金星. 天然气地质和地球化学论文集(卷2)[M]. 北京:石油工业出版社,2000:1-287.
Dai Jinxing. Selected works of natural gas geology and geochemistry (V2) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000: 1-287.
- [3] 张宝收,顾乔元,张海祖,等. 塔中地区碳酸盐岩高含量二氧化碳的产生及研究意义[J]. 海相油气地质,2010,15(3):70-73.
Zhang Baoshou, Gu Qiaoyuan, Zhang Haizu, et al. Genesis and study significance of high CO_2 content in carbonate rocks in Tazhong area, Tarim Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2010, 15(3): 70-73.
- [4] 戴金星,戴春森,宋岩,等. 中国东部无机成因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 Jinxing, Dai Chunsheng, Song Yan, et al. Inorganic genetic carbon dioxide gas accumulations and their characteristics in East part of China [J]. Offshore Oil & Gas (Geology), 1994, 8(4): 215-222.
- [5] Hall D L, Sterner S M, Bodnar R J. Freezing point depression of NaCl-KCl- H_2O solution [J]. Econ Geol, 1988, 83: 197-202.
- [6] 朱筱敏,王贵文,谢庆宾. 塔里木盆地志留系层序地层特征[J]. 古地理学报,2001,3(2):64-71.
Zhu Xiaomin, Wang Guiwen, Xie Qingbin. Sequence stratigraphy of Silurian in Tarim Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2001, 3(2): 64-71.
- [7] 张一伟,金之钧,刘国臣,等. 塔里木盆地环满加尔地区主要不整合形成过程及剥蚀量研究[J]. 地质前缘,2000,7(4):449-457.
Zhang Yiwei, Jin Zhijun, Liu Guochen, et al. Study on the formation of unconformities and the amount of eroded sedimentation in Tarim basin [J]. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 2000, 7(4): 450-457.

(编辑 李 军)

《石油与天然气地质》获 “2014 中国国际影响力优秀学术期刊” 称号



根据中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、清华大学图书馆和中国学术文献国际评价研究中心联合发布的《中国学术期刊国际引证年报(2014版)》数据,《石油与天然气地质》期刊的国际影响力指数CI为38.140,跻身“2014中国国际影响力TOP学术期刊”行列,荣获“2014中国国际影响力优秀学术期刊”称号。

(李 军 供稿)