

松辽盆地昌德无机气藏近地表 地球化学勘探实验研究

陈银节 汤玉平 黄欣

(中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所 江苏 无锡 214126)

摘要: 松辽盆地昌德气藏是目前世界上发现的唯一有充分地球化学依据,以产烷烃气为主的无机成因气藏。加强对昌德无机气藏的解剖,对于拓展我国天然气的勘探领域,具有重要意义。在昌德气藏上方,布置了一条贯穿芳深 1 井和芳深 2 井的地球化学剖面,通过研究不同地球化学指标在气藏上方的显示特征,确定了昌德气藏有效地球化学方法组合及异常识别标志。同时,结合甲烷碳同位素的分析,可以从一定程度上判断下伏气藏的无机成因属性。

关键词: 无机成因;地球化学;烷烃气;昌德气藏;松辽盆地

中图分类号: TE122.1⁺13

文献标识码: A

Near-surface geochemical exploration in the Changde inorganic gas reservoir, Songliao Basin

Chen Yinjie, Tang Yuping, Huang Xin

(Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China)

Abstract: The Changde gas reservoir in the Songliao Basin is the only inorganic gas reservoir in the world which mainly produces alkane gas with a full geochemical complement. Therefore, the study of Changde inorganic gas reservoir has a great significance for the development of China's natural gas exploration. We designed a geochemical profile crossing wells Fangshen1 and Fangshen2 above the Changde gas reservoir, studied the near-surface display of different geochemical indicators, and selected effective geochemical methods and abnormal indicators. The analysis of methane carbon isotopes can help judge the inorganic origin of the reservoir.

Key words: inorganic origin; geochemistry; alkane gas; Changde gas reservoir; Songliao Basin

一个多世纪前,就有学者提出了石油天然气的无机(非生物)成因假说,但对其能否形成大规模油气藏的争论从来都没有平息。不同的天然气成因理论,会促使油气勘探新方向、新技术及新方法的产生。因此,对天然气成因类型的探讨,不仅有重要的理论意义,而且也有重大的实践意义^[1]。

自 20 世纪 80 年代以来,我国也有许多学者一直致力于非生物(无机)成因油气理论的研究,但是他们的研究没有引起石油地质学界的重视,更没有被勘探界所采纳^[2]。这是由于绝大多数人员相信有机成油气理论,在沉积盆地中寻找油气达成了共识,并把变质岩及火成岩的出露区当作找油气的禁区,以致于无机油气田很少发现,这可能是油气勘查史上的一大失误。当然,也由于过去无人提出具体成藏模式,勘查工作无从入手,也是重要原因^[3]。

如果缺乏有效盖层和合适的圈闭条件,自然产出的无机成因气体(烷烃气、CO₂和 He 等)就完全散失。但在具备良好盖层及圈闭的条件下,这些无机成因气就有可能聚集成为气藏,成为非生物成因气(无机气)资源。在沉积盆地内,若有以上自然产出的非生物气,便有可能形成非生物气田^[4]。

在世界范围内,已经发现了很多有充分地球化学依据的非生物气及其气藏,其中不仅包括 CO₂和 He 等气体及其气藏,而且还发现了非生物成因的烷烃气田。1979 年 Welham 等研究表明,东太平洋 21°N 处中脊喷出的热液(400 °C)中,含氢气、氦以及甲烷,每年喷出氦气 12×10⁸ m³,甲烷气 1.6×10⁸ m³,其 δ¹³C₁ 值为 -17.6‰ ~ -15‰,R/Ra 值约为 8,说明这些气体是幔源成因^[4-5]。据统计,云南腾冲澡塘河热泉中的天然气,年排出天然气 26.68×10⁴ m³,气体

收稿日期: 2016-01-05; 修订日期: 2016-07-12。

作者简介: 陈银节(1965—),男,高级工程师,从事油气地球化学勘查工作。E-mail: chenyj.syky@sinopec.com。

基金项目: 中国石化科技部的项目“非烃气地球化学勘探技术方法研究与应用”(P08059)。

组分主要为 CO₂, 并含少量甲烷, 其 δ¹³C_{CO₂} 值为 -1.9‰ ~ -6.3‰, δ¹³C₁ 值为 -19.95‰ ~ -29.30‰^[6]。通过许多学者对于无机成因气田(藏)的不断研究, 在我国不仅发现了一批无机成因 CO₂ 气田(藏), 同时还首次科学地肯定了无机成因的烷烃气藏, 即昌德气藏。昌德气藏是目前世界上唯一有充分地球化学依据的以产烷烃气为主的无机成因气藏^[7]。

昌德气藏地处松辽盆地北部徐家围子断陷, 研究认为, 该断陷具备形成非生物天然气的有利条件, 因此该地区应该是寻找非生物天然气的有利地区^[8]。随着昌德烷烃气藏及昌德东气藏的发现, 该地区已经成为世界上非生物成因气研究的最理想场所。加强对昌德气藏的解剖研究, 对于拓展我国天然气的勘探方向及领域, 具有重要的理论和实践意义。鉴于此, 在昌德气藏上方, 进行了近地表地球化学勘探实验研究, 进一步拓展无机成因气藏有效勘探技术和方法。

1 昌德气藏特征

昌德气藏地理位置上位于大庆市大同区、肇州县和安达市境内。该气藏具有储层埋藏深度大、渗透率低、气井产量低、稳产能力差的特点^[9-10]。该气藏构造上位于松辽盆地三肇凹陷的昌德一大青山构造, 其为变质岩基底隆起上发育起来的背斜, 为岩性构造型气藏。该构造上发育有多条近南北及北东向断层。断层向上消失于泉头组泥岩段中, 断距一般在 50 ~ 100 m, 但断距向下明显增大, 在基岩面附近, 断距可达 500 m 以上。这些深切变质岩基底的断裂构成了无机成因气向上运移的通道^[11]。

芳深 1 井为该区所钻的第一口深层探井。该井在登娄库组气层的 2 926.0 ~ 2 940.2 m 井段, 日产气 2 000 m³。随后对该层段压裂后自喷求产, 获日产 40 814 m³ 的工业气流, 这也标志着昌德气藏的成功发现。芳深 1 井钻获工业气流后, 在该地区先后部署了芳深 2、芳深 3 及芳深 4 井。其中芳深 2 井和芳深 4 井也钻获工业气流, 芳深 3 井以产水

为主^[12]。

区内各井所产出的气体均以甲烷为主(甲烷含量均在 80% 以上), 同时含少量的重烃和 CO₂ 气体(表 1)。尽管国内外学者对于划分无机成因和有机甲烷的 δ¹³C₁ 界限值, 存在一定程度的差异, 但一般都倾向于将界限值限定在 25‰ 左右。其中戴金星综合分析认为^[6] 将无机与有机甲烷的 δ¹³C₁ 界限值定为大于 -30‰。而昌德气藏(芳深 1 井、芳深 2 井)的 δ¹³C₁ 值均在 -20‰ 以上, 具有明显的无机成因气特征。同时, 无机成因烷烃气同位素的另一个明显特征是具负碳同位素系列(即 δ¹³C₁ > δ¹³C₂ > δ¹³C₃ > δ¹³C₄)。芳深 1 井的 δ¹³C₁, δ¹³C₂, δ¹³C₃, δ¹³C₄ 值分别为 -18.7‰, -22.4‰, -24.1‰, -28.2‰, 负碳同位素系列特征明显。芳深 2 井的天然气也具有同样的特征。芳深 1 井的氦同位素 R/Ra 为 0.5, 属壳源型。根据以上特征, 判断昌德气藏烷烃气体总体上是壳源无机成因是较为科学的结论。昌德气藏是以烷烃气为主的无机成因气藏。该类气藏的发现不仅在国内属首次, 国外亦未见报道^[4]。

2 昌德气藏地球化学指标特征

为更好地对昌德气藏进行解剖, 在昌德气藏上方布置了地球化学研究剖面, 剖面分别经过芳深 1 井和芳深 2 井, 由南北方向贯穿昌德气藏, 并分别向南北两端延伸, 作为地球化学研究的背景。剖面线长 16 km, 按 0.25 km 的采样间距, 共布置化探测量点 65 个, 并在各测量点采集了顶空气、游离气及土壤等不同介质的样品(图 1)。对所采样品进行了不同方法的地球化学分析, 包括酸解烃、热释烃、顶空气、游离烃、ΔC、热释汞、微量元素及甲烷碳同位素等(表 2)。

从表 3 各指标特征值统计结果来看, 与其他地区相比, 酸解烃指标表现为低丰度、高变异的特点, 游离烃指标表现为中等丰度的特征, 其他指标均表现为中低丰度、低变异的特征。

表 1 松辽盆地昌德气藏天然气地球化学特征^[12]

Table 1 Geochemical features of natural gas from the Changde gas reservoir, Songliao Basin

井号	井段/m	天然气组分含量/%			天然气碳同位素(PDB)/‰				
		CH ₄	C ₂₊	CO ₂	全气	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀
芳深 1	3 064 ~ 3 155					-18.7	-22.4	-24.1	-28.2
芳深 1	2 926 ~ 2 940	86.21	0.946	0.81	-17.58				
芳深 2	3 093 ~ 3 105	93.87	0.615	0.50		-16.7	-19.2	-24.3	
芳深 2	2 768 ~ 3 038	93.01	1.246	0.22	-15.23				
芳深 3	2 870 ~ 2 874	82.82	0.525	0.56	-22.07				
芳深 4	3 134 ~ 3 170				-20.88				

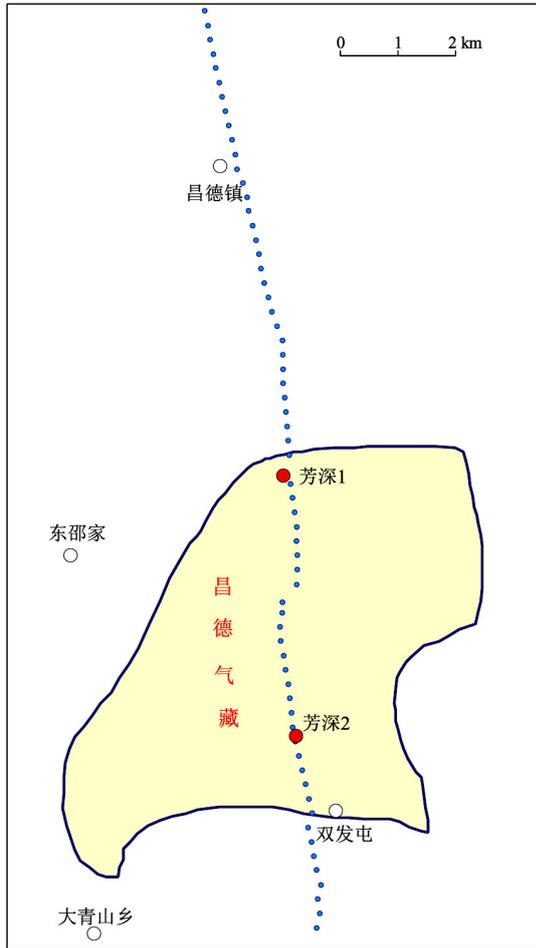


图 1 松辽盆地昌德气藏地球化学实验剖面位置

Fig. 1 Geochemical test locations in the Changde gas reservoir, Songliao Basin

表 2 松辽盆地昌德地区地球化学分析测试项目明细

Table 2 Geochemical analysis and test items in the Changde gas reservoir, Songliao Basin

分析项目	样品数/个	分析项目	样品数/个
顶空气	63	ΔC	65
热释烃	65	热释汞	65
酸解烃	65	微量元素	65
游离烃	65	甲烷碳同位素	2

从不同方法指标间的相关关系及聚类关系来看(图 2),除游离烃外,不同烃类检测方法(酸解烃、热释烃、顶空气)的甲烷及其同系物间,均呈显著相关关系,而游离烃甲烷与重组分呈弱相关关系。不同方法间相关性较差,其中顶空气甲烷与游离烃甲烷显著相关,热释汞与热释烃指标呈相关关系,其他各方法指标间均无明显的相关关系。

3 昌德气藏有效化探指标筛选

近地表油气地球化学勘探技术经过近 50 年的

表 3 松辽盆地昌德气藏部分化探指标特征

Table 3 Geochemical indicators of the Changde gas reservoir, Songliao Basin

指标	极小值	极大值	均值	标准差
顶空气甲烷/($\mu\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$)	2.44	19.65	5.43	2.58
顶空气重烃/($\mu\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.12	6.64	1.08	0.92
热释烃甲烷/($\mu\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$)	2.21	26.62	6.59	3.34
热释烃重烃/($\mu\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.38	100.52	15.88	15.80
酸解烃甲烷/($\mu\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$)	4.98	134.82	16.95	21.57
酸解烃重烃/($\mu\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.19	31.30	2.32	4.65
游离烃甲烷/($\mu\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$)	3.89	85.30	11.08	10.76
游离烃重烃/($\mu\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.26	9.50	1.24	1.32
ΔC/%	0.57	3.21	1.50	0.47
热释汞/ 10^{-9}	1.79	10.32	5.56	2.16

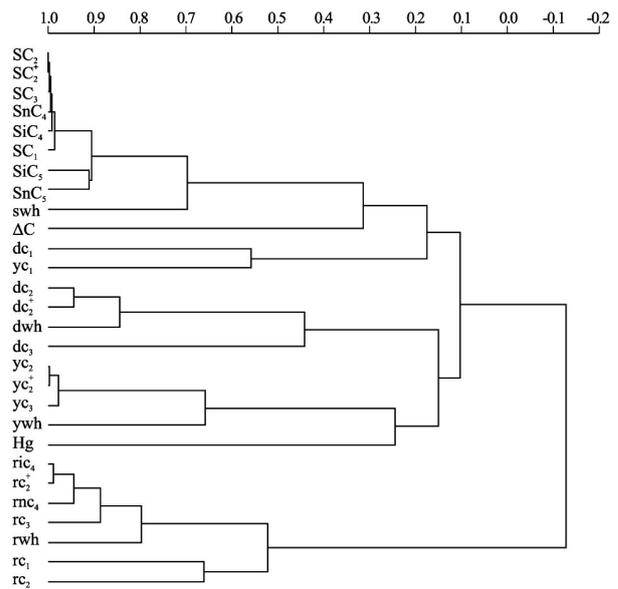


图 2 松辽盆地昌德地区化探指标聚类分析谱系

Fig. 2 Cluster analysis of petroleum geochemical exploration indexes in the Changde gas reservoir, Songliao Basin

发展,形成了一整套较为成熟的方法指标。根据对于油气组分的关联度,大致可以将油气化探方法分为直接和间接两大类。直接方法检测对象是近地表游离态、吸附态及溶解态的烃类组分,具体包括游离烃、顶空气、酸解烃、热释烃、吸附丝、紫外吸收光谱、荧光光谱等;间接方法检测地表环境中,由于烃类微渗漏所引起的各种物理、化学及生物变化,包括微生物、蚀变碳酸盐、微量元素、汞、碘、氩、微磁、氧化还原电位及放射性等。由于深部地质条件及油气藏类型的差异,不同指标的异常显示也不尽相同。大量化探成果表明,油气藏上方地表及浅层基本上都有化探异常分布^[13]。选择对于本地区无机气藏适用的地球化学方法,是极其重要的一个环节。

3.1 酸解烃指标在昌德气藏顶端显示异常

酸解烃是地表烃类气体测量法中较为经典的

方法之一 其方法原理是对样品进行酸化处理,然后用气相色谱仪分析所释放的烃类气体。该方法主要测定岩石、土壤等介质所包含的碳酸盐及其胶结物中所吸留的烃类气体。油气藏中的烃组分在垂向渗散的过程中,地表的土壤经累积吸附会引起烃类的浓度变化,通过检测土壤中烃类的异常分布及形态,进行下覆油气藏的预测。

酸解烃方法在昌德气藏区域发现了异常,呈顶端异常形态(图3),同时,在气藏区域,酸解烃的湿度也明显增大。酸解烃方法较好地指示了昌德无机成因气藏的存在,呈现顶部块状异常特征。

3.2 顶空气指标在昌德气藏两侧呈现异常

除去微生物消耗以及吸留包裹于土壤介质中外,还有一部分以物理吸附态被土壤或岩石颗粒表面所吸附。化探样品采用密封容器封装并经一段时间的平衡后,分析密封容器中顶部空间的气体组成和浓度。顶空气法是油气化探较为成熟的方法之一,在全国不同盆地及地区的天然气勘探中得以应用并取得较好的效果。

顶空气指标在昌德气藏的顶端与背景值相当,但在气区的两侧边界附近,存在高值异常,在剖面上呈马鞍形异常特征(图4),顶空气方法在气藏附近不仅存在组分异常,而且有组构异常存在,其重轻比指标也在气藏附近呈现高值。顶空气指标较好地指示了昌德无机成因气藏的存在,呈现马鞍状异常特征。

3.3 游离烃指标在昌德气藏顶端及其邻近显示不规则异常

游离烃是油气化探最早开发和应用的方法。其方法特点是直接抽取近地表土壤中的气体,然后注入气相色谱仪进行测定。整个过程不经过任何的化学处理和改造,真实地反映了所测试对象的原

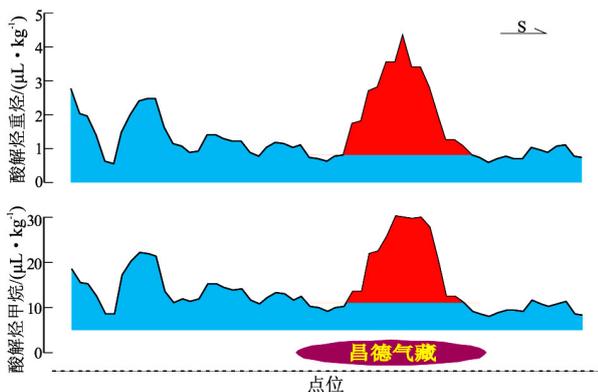


图3 松辽盆地昌德气藏酸解烃指标地球化学剖面
Fig. 3 Geochemical profile of acidolysis hydrocarbon in the Changde gas reservoir, Songliao Basin

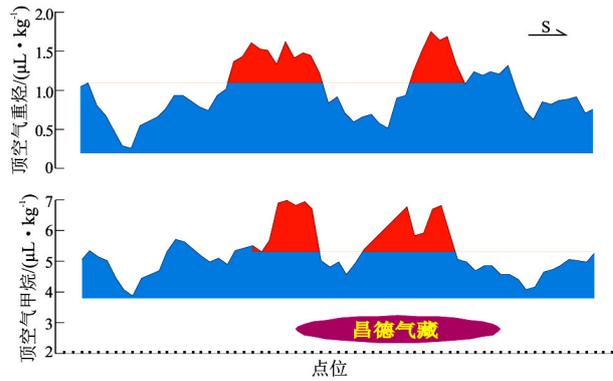


图4 松辽盆地昌德气藏顶空气指标地球化学剖面
Fig. 4 Geochemical profile of headspace gas in the Changde gas reservoir, Songliao Basin

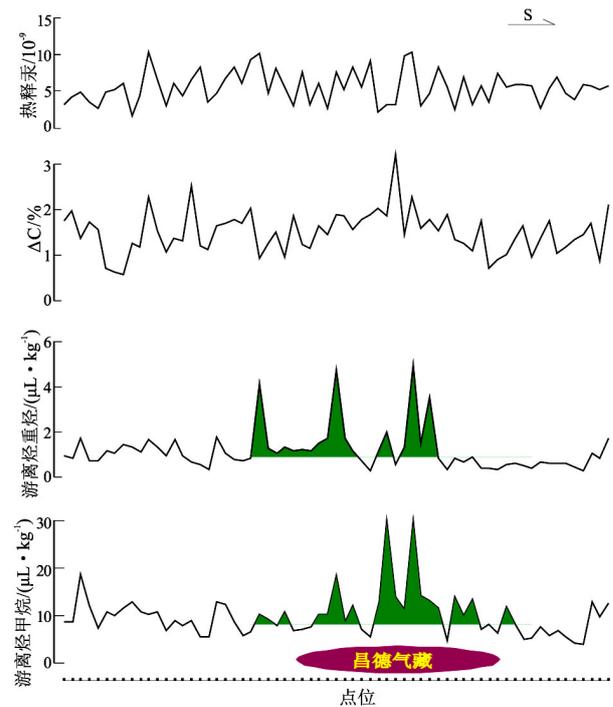


图5 松辽盆地昌德气藏游离烃、 ΔC 及热释汞指标地球化学剖面

Fig. 5 Geochemical profile of free hydrocarbon, alternative carbonate and heat-release mercury in the Changde gas reservoir, Songliao Basin

始成分。近年来在国内外得到了广泛应用,美国、加拿大等国的一些油田及公司,甚至将游离烃作为油气化探唯一的指标加以运用,取得良好的效果^[14]。

在昌德气藏上方,游离烃指标波动加剧,并形成较为明显的异常(图5),同时,在无机成因气藏附近,断裂的上倾方向,也会形成强烈的游离烃异常。游离烃指标较好地指示了昌德无机成因气藏的存在,其在气藏顶端及邻近呈现不规则尖峰异常。

3.4 蚀变碳酸盐对气区有一定的识别能力

从实验结果看, ΔC 指标对气区有一定的反映

表4 松辽盆地昌德、平方王测区碳同位素检测

Table 4 Detection of carbon isotopes in the Changde and Pingfangwang areas, Songliao Basin

序号	样号	甲烷碳同位素 检测值(PDB) ‰
昌德	气藏外围 cd39	-42.59
	气藏上方 cd42	-20.13
山东某地	pc30	-34.94
	pc41	-43.8
	pf05	-47.96
	pf08	-37.35
	pf09	-31.09
	pf18	-43.67

能力。其在气区附近波动性明显加剧,背景值抬升,并形成明显的正异常。但不足的是,该方法在气藏以外的区域,也存在一定程度的异常显示。

3.5 热释汞、热释烃及微量元素指标效果不明显

从本区试验结果看,热释汞及微量元素指标波动具有极大程度的随机性,对昌德无机成因气藏不具有明显的指示意义。

3.6 甲烷碳同位素

甲烷的碳同位素组成,是鉴别天然气成因类型的一个重要方法。不同成因的天然气具有其特征的碳同位素组成,自然界甲烷的 $\delta^{13}C_1$ 值分布范围一般介于 $-105‰ \sim -10‰$ 之间^[15-16]。截至目前,世界一些地区所获得的非生物成因甲烷的 $\delta^{13}C_1$ 值,几乎都大于 $-25‰$,戴金星、王先彬等^[16-17],将甲烷的 $\delta^{13}C_1 > -30‰$ 视为判识非生物成因甲烷地球化学指标。昌德气藏(芳深1井、芳深2井)的甲烷 $\delta^{13}C_1$ 均大于 $-20‰$,具有明显的无机成因天然气特征。

由于本次在昌德地区所检测的游离烃甲烷指标,普遍测量值较低,为保证甲烷碳同位素测量结果的可靠性,仅有2个样品的测量值达到甲烷碳同位素的检测要求。这2个样点位于芳深1井和芳深2井的中间地带,其中一个样点的甲烷碳同位素测量值为 $-20.13‰$,明显指示了无机成因气的特征(表4)。

作为对比,同期在其他地区选择样品,以同样的方式进行了甲烷碳同位素的检测,但这些对比组样品甲烷碳同位素测量值,均在 $-31.09‰ \sim -47.96‰$ 之间,只有昌德气藏上方的cd42样点,唯一显示了无机成因气特征。

4 结论

(1) 对昌德无机成因气藏的地球化学解剖研究表明,在现有化探技术条件下的相对有效的方法

组合是:主要指标顶空气、酸解烃和游离烃,辅助指标为蚀变碳酸盐;热释烃、热释汞及微量元素指标对于昌德气藏反映不显著。

(2) 从已知气藏上方各指标的异常显示情况来看,昌德无机成因气藏近地表地球化学识别标志为:在气藏上方,酸解烃及 ΔC 指标显示高值异常;在气藏的边缘,将出现顶空气的马鞍状异常;在气藏区域及其邻近的范围内,游离烃指标测量值波动加剧,显示为大范围高值基础上的多个尖峰状异常。通过多方法的组合,可以有效提高无机成因气藏勘探成功率。

(3) 在上述不同地球化学指标识别气藏的基础上,配合游离烃甲烷碳同位素的检测,可以在一定程度上判断下伏气藏的无机成因属性。

参考文献:

- 王先彬. 非生物成因天然气理论的宇宙化学依据[J]. 天然气地球科学, 1990, 1(1): 4-8.
Wang Xianbin. The cosmic chemical basis of the theory of abiogenic natural gas[J]. Natural Gas Geoscience, 1990, 1(1): 4-8.
- 张景廉, 曹正林, 张宁, 等. 关于无机生油理论的思考[J]. 石油实验地质, 1999, 21(1): 8-11.
Zhang Jinglian, Cao Zhenglin, Zhang Ning, et al. Thinking of inorganic origin theory on petroleum [J]. Experimental Petroleum Geology, 1999, 21(1): 8-11.
- 陈沪生. 积极开展无机成因油气领域的勘查: 无机成因油气是油气资源战略后备领域[J]. 石油实验地质, 1998, 20(1): 1-5.
Chen Husheng. Taking a vigorous action to exploration of inorganic-sourced hydrocarbon [J]. Experimental Petroleum Geology, 1998, 20(1): 1-5.
- 戴金星. 非生物天然气资源的特征与前景[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(1): 1-6.
Dai Jinxing. Characteristic of abiogenic gas resource and resource perspective [J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(1): 1-6.
- Welhan J A, Craig H. Methane and hydrogen in East Pacific rise hydrothermal fluids [J]. Geophysical Research Letters, 1979, 6(11): 829-831.
- 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, 33(15): 1168-1170.
Dai Jinxing. Composition characteristics and origin of carbon isotope of Liuhuangtang natural gas in Tengchong county, Yunnan province [J]. Chinese Science Bulletin, 1989, 34(12): 1027-1030.
- 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 Jinxing, Qin Shengfei, Tao Shizhen, 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.
- 侯启军, 杨玉峰. 松辽盆地无机成因天然气及勘探方向探讨[J].

天然气工业 2002 22(3):5-10.
 Hou Qijun ,Yang Yufeng. Abiogenetic natural gases in Songliao Basin and their exploration prospects [J]. Natural Gas Industry , 2002 22(3):5-10.

[9] 纪学雁. 昌德气田储层特征研究[J]. 长江大学学报(自然科学版) 2013 ,10(16):5-7.
 Ji Xueyan. Reservoir characteristics research in Changde reservoir [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition) ,2013 , 10(16):5-7.

[10] 杨玉峰, 万俭英, 杨波, 等. 昌德含气系统成藏关键时刻的确定[J]. 大庆石油地质与开发 2002 21(1):23-24.
 Yang Yufeng ,Wan Jianying ,Yang Bo ,et al. Determination of the critical time of hydrocarbon accumulation in Changde gas bearing system [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing 2002 21(1):23-24.

[11] 戴金星, 石昕, 卫延召. 无机成因油气论和无机成因的气田(藏)概略[J]. 石油学报 2001 22(6):5-10.
 Dai Jinxing ,Shi Xin ,Wei Yanzhao. Summary of the abiogenic origin theory and the abigenic gas pools (fields) [J]. Acta Petrolei Sinica 2001 22(6):5-10.

[12] 张晓东, 杨玉峰, 殷进垠, 等. 松辽盆地昌德气田天然气成因及成藏模式[J]. 现代地质 2000 ,14(2):203-208.
 Zhang Xiaodong ,Yang Yufeng ,Yin Jinyin ,et al. Origin and accumulation model of natural gases in Changde gas field ,the Songliao Basin [J]. Geoscience 2000 ,14(2):203-208.

[13] 夏响华. 油气地表地球化学勘探技术的地位与作用前瞻[J]. 石油实验地质 2005 27(5):529-533.
 Xia Xianghua. Looking forward to the position and role of surface geochemical exploration for oil and gas [J]. Petroleum Geology & Experiment 2005 27(5):529-533.

[14] 伍思杭, 魏梅华. 油气化探游离烃类富集技术与应用[J]. 石油实验地质 ,1993 ,15(2):213-219.
 Wu Sihang ,Wei Meihua. An enrichment technique of free hydrocarbons and its application in petroleum geochemical exploration [J]. Experimental Petroleum Geology ,1993 ,15(2):213-219.

[15] 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 2(3):1-40.
 Dai Jinxing. Hydrocarbon isotopic characteristics of natural gas and the identification of various types of natural gas [J]. Natural Gas Geoscience ,1993 2(3):1-40.

[16] 王先彬, 郭占谦, 妥进才, 等. 非生物成因天然气形成机制与资源前景[J]. 中国基础科学 2006 8(4):12-20.
 Wang Xianbin ,Guo Zhanqian ,Tuo Jincai ,et al. Formation mechanism and resources prospect of the abiogenic gas [J]. China Basic Science 2006 8(4):12-20.

[17] 戴金星. 各类天然气的成因鉴别[J]. 中国海上油气(地质) ,1992 6(1):11-19.
 Dai Jinxing. Identification of various genetic natural gases [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology) ,1992 6(1):11-19.

(编辑 黄娟)



(上接第658页)

[20] 冯乔, 柳益群, 郝建荣. 三塘湖盆地芦草沟组烃源岩及其古环境[J]. 沉积学报 2004 22(3):513-517.
 Feng Qiao Liu Yiqun Hao Jianrong. The source rock and its palaeo-environment of Lucaogou Formation Permian in Santanghu Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica 2004 22(3):513-517.

[21] 杜宏宇, 王鸿雁, 徐宗谦. 马朗凹陷芦草沟组烃源岩地化特征[J]. 新疆石油地质 2003 24(4):302-305.
 Du Hongyu ,Wang Hongyan ,Xu Zongqian. Geochemical characteristics of Lucaogou source rock in Malang Sag ,Santanghu Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology ,2003 ,24(4):302-305.

[22] 傅家谟, 秦匡宗. 干酪根地球化学[M]. 广州: 广东科技出版社 ,1995.
 Fu Jiamo ,Qin Kuangzong. Geochemistry of kerogen [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press ,1995.

[23] 王作栋, 陶明信, 梁明亮, 等. 三塘湖盆地上二叠统芦草沟组烃源岩地球化学特征[J]. 沉积学报 ,2012 ,30(5):975-982.
 Wang Zuodong ,Tao Mingxin ,Liang Mingliang ,et al. Character-

istics of organic geochemistry of Lucaogou Formation source rocks ,Upper Permian ,Santanghu Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica 2012 30(5):975-982.

[24] 王启军, 陈建渝. 油气地球化学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社 ,1988:99-101.
 Wang Qijun ,Chen Jianyu. Petroleum geochemistry [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press ,1988:99-101.

[25] Logan G A ,Hayes J M ,Hieshima G B ,et al. Terminal Proterozoic reorganization of biogeochemical cycles [J]. Nature ,1995 ,376(6535):53-56.

[26] Hayes J M. Factors controlling ¹³C contents of sedimentary organic compounds: Principles and evidence [J]. Marine Geology , 1993 ,113(1/2):111-125.

[27] Close H G ,Bovee R ,Person A. Inverse carbon isotope patterns of lipids and kerogen record heterogeneous primary biomass [J]. Geobiology 2011 9(3):250-265.

(编辑 徐文明)