

多参数地球化学勘探在沙漠地区圈闭构造含油气潜力评价中的应用

——以塔里木盆地TD-2构造为例

李志明¹, 张长江¹, 宋喜林²
LI Zhi-ming¹, ZHANG Chang-jiang¹, SONG Xi-lin²

1. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214151;
2. 中国石油东方地球物理勘探有限责任公司, 河北 涿州 072751
1. *Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, RIPEP, SINOPEC, Wuxi 214151, Jiangsu, China;*
2. *BGP CNPC, Zhuo zhou 072751, Hebei, China*

摘要:TD-2 构造位于塔里木盆地中央隆起带东部, 虽然地震和重力勘探证实其是一个基底隆起背斜构造, 并且据区域地质构造演化分析具有良好的油气潜力, 但因缺乏地球化学信息, 进一步的勘探(如钻探)尚未进行。由此, 开展了多参数地球化学勘探, 所用参数为土壤游离烃(C₁—C₅)、酸解烃(C₁—C₅)、ΔC 和 Hg。结果的综合解释得出: 对评价沙漠区 TD-2 构造的油气潜力来说, 游离烃明显好于其他地球化学参数; 近地表地球化学异常的形态和地球化学特征暗示, TD-2 构造是一个含干气的构造, 处于低—中等的逸散阶段。因此, TD-2 构造应当具有一定的油气潜力。多参数地球化学勘探结果为进一步的勘探提供了重要依据。

关键词:多参数地球化学勘探; 油气潜力评价; TD-2 构造; 塔里木盆地

中图分类号:P618.13; P632 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2009)11-1668-06

Li Z M, Zhang C J, Song X L. Application of multi-parametric geochemical exploration to hydrocarbon potential evaluation for trapped structure in desert area: A case study of TD-2 structure in Tarim basin, China. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(11):1668-1673

Abstract: TD-2 structure locates in the eastern area of the central uplift zone of Tarim basin, China. Although it is a basement-uplift anticline type structure which is verified by seismic and gravity exploration, according to analysis of regional geological evolution history, and it should have potential good for oil and gas, the further exploration such as drilling is suspended because of lacking geochemical information. Therefore, multi-parametric geochemical survey is conducted. These geochemical parameters include free hydrocarbons (C₁—C₅), acid hydrocarbons (C₁—C₅) of soil, ΔC and Hg. Interpretation of the results leads to the conclusions that the free hydrocarbons are obviously more viable than other geochemical parameters for oil and gas potential evaluation of TD-2 structure in desert area, and the shapes of near-surface geochemical anomalies and geochemical characteristics parameters suggest that TD-2 structure is a dry gas-bearing structure at the early-middle dissipation stage. So TD-2 structure should have promising potential for oil and gas, and the results of multi-parametric geochemical survey have provided important information for further exploration.

Key words: multi-parametric geochemical exploration; hydrocarbon potential evaluation; TD-2 structure; Tarim basin

20 世纪 30—40 年代早期, Sokolov^[1]在俄罗斯、Laubmeyer^[2]在德国、Horvitz^[3]和 Rosaire^[4]在美国先后进行了油气地球化学调查。从那时以来, 油气地球化学勘探方法已经历了近 70 年。在过去的 70 年中, 开

收稿日期: 2009-08-25; 修订日期: 2009-09-01
科技项目: 中国石油塔里木盆地石油勘探与开发指挥部项目《塔里木盆地塔东 2 构造油气地球化学勘探》资助
作者简介: 李志明(1968—), 男, 博士, 高级工程师, 从事地球化学、石油地质综合评价工作。E-mail: lzm@mail.wuxisuo.com

发了许多指标,包括近地表土壤、水底和近海沉积物中的烃类指标,如甲烷(C_1)、乙烷(C_2)、丙烷(C_3)、丁烷(C_4)等,以及非烃指标,如 ΔC 、 Hg 、 I 的浓度等;提出了多种烃类微渗漏和垂向运移的理论,说明下伏油气藏的烃类主要以垂向运移渗漏,并形成近地表的烃类和非烃类地球化学异常。总体而言,油气地球化学勘探方法的基础是,圈定近地表地球化学异常,用于指导区域(盆地)范围或局部构造的下一步勘探工作和地下油气潜力的评价。

不过,影响近地表地球化学异常的干扰因素太多太复杂,如地质构造、岩性、地貌、气候、生物化学作用、人类污染等,且有时很强,经常减弱甚至掩盖油气藏的直接或间接近地表异常^[5],就连土壤湿度亦能增减轻烃的浓度^[6]。另外,气态烃从地下油气藏的运移不是严格垂向的^[7],沿断层、裂缝、不整合面、层面或微裂隙发生复杂的变向^[8]。同时,近地表异常的形态也取决于地下油气藏的逸散阶段^[9]和下伏沉积物的地质、水文条件^[10]。上述所有影响或制约近地表异常的因素,都会导致异常解释的不确定性,使之与下伏油气田的垂向对应关系不明确。这是 70 年来对地球化学方法一直存在争议的关键原因。

尽管如此,油气勘查资料解释的不确定性并非化探独有,地质、物探亦常遇此困境,但也并非前无古人。目前,油气勘探正在开拓地质、地球物理和地球化学成功结合与协调之路,地质条件为前提,地球物理技术圈定可能含油气藏的区域或构造,地球化学方法则用于确定这些区域和构造内是否存在油气聚集^[11]。据此确定下一步勘探的靶区甚至钻探位置,可大大降低费用,明显提高成功率。据一些统计结果^[5,12-13],常规油气勘探方法的成功率为 10%~17%(平均 15%);而常规勘探方法与近地表化探相结合的综合勘探法,成功率显著提高,为 22%~90%(平均约 58%),且否定成功率更高。据 Oboleyn 等(1983)报道,使用油气地球化学勘探来评价局部构造的油气潜力,否定成功率出人意料地达到 100%。这使得一些人认为,油气地球化学勘探的最佳利用是确定哪里不需要进行钻井^[12]。

因此,油气化探是降低勘探风险的简便、经济的方法手段,在油气勘探中具有很重要的作用。当前勘探的失败,多归因于数据解释简单化,对改变微渗漏运移方向的水文和地质因素重视不够^[10]。

1 研究区概述与地球化学勘探的目的

在地质构造上,研究区(TD-2 构造)位于塔里木盆地中央隆起带东部的塔东低隆起(图 1),是从加里东—海西早期长期发展起来的台隆,在海西中晚期—印支期继续隆起,遭受了长期的风化剥蚀,直到燕山期才逐渐下降接受沉积。研究区发育的沉积地层有震旦系、寒武系、奥陶系、白垩系和新生界。其中震旦系—奥陶系厚 2500~5000m,白垩系厚 200~600m,新生界厚 1800~2400m。主要烃源岩位于震旦系—奥陶统中^[14]。

研究区地表全部为沙漠覆盖,其中西部为蜂窝状的沙丘,东北部为北北东向的沙垄,相对高差较大,约 200m。但景观单一并且无污染,气候干燥,这些是开展油气化探的有利条件。不过,地表沙土的活动性是不利因素,因为其中的烃与非烃指标可能并不代表拟探测的当地深部源,必须从埋深相对较大的非流动土中采集样品。

20 世纪 80—90 年代,重力和地震勘探证实 TD-2 构造是一个基底隆起背斜型构造。据区域地质构造演化分析,该构造具有良好的油气潜力,但因缺乏含油气性的地球化学信息,进一步的勘探(如钻探)尚未进行。为了加快塔东低隆起的勘探步伐,塔里木石油勘探与开发指挥部部署了油气地球化学勘探:①研究 TD-2 构造近地表烃类地球化学场的分布特征;②综合其他勘探资料评价 TD-2 构造的油气潜力,为钻井布设提供地球化学依据;③积累在沙漠区开展油气地球化学勘探的经验。

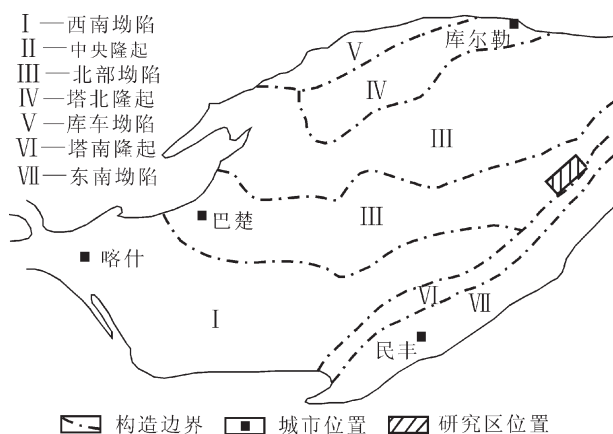


图 1 塔里木盆地构造简图与研究区的位置

Fig. 1 Sketch structural map of Tarim Basin and location of study area

2 样品采集与分析方法

研究区共部署了 21 条测线,测线方向为 NW67°,长度介于 20~40km 之间,线距介于 3~4km 之间,样点间距一般为 500m。地球化学指标包括:土壤孔隙游离烃(C₁~C₅),土壤酸解烃(C₁~C₅)和土壤 ΔC、Hg。

野外现场采样包括采集土壤游离气和土壤。土壤游离气用于游离烃(C₁~C₅)的现场分析,土壤用于在实验室分析酸解烃(C₁~C₅)、ΔC 和 Hg。采样深度试验显示,3m 和 4m 深度的游离烃浓度均高于 2m 深度的结果,而 3m 和 4m 深度的游离烃浓度彼此一致,故确定采样深度为 3m。游离烃浓度没有明显受地貌起伏的影响,但一些采样点明显受浅部地下水面的影响,导致浓度显著降低。采样深度试验发现,在一些低洼区地下水面很浅,约 1.5m。所以,为了保持 3m 的采样深度,在实际采样中避开了高大的沙丘区和低洼地区。图 2 为现场工作的简图。

首先,用特制的钻具钻至地表下 3m 的深度,用一次性无菌注射器从钻杆底部抽取气体,并及时送到仪器车,直接注入气相色谱分析游离烃(C₁~C₅)的浓度,分析结果录入计算机,进行现场初步的处理与解释。同时,现场收集螺旋钻返出的底层土样 500 g,按有关技术规范要求包装与放置,用于在实验室分析酸解烃(C₁~C₅)、ΔC 和 Hg。这些指标的样品预处理和分析方法,按参考文献[12]描述的方法进行,分析仪器列于表 1。

3 指标的地球化学特征与异常提取

为了显示研究区各指标的地球化学特征,利用 SPSS(Statistical Package for the Social Sciences)计算了每个指标的最小值、最大值、均值、标准离差和变异系数。统计结果列于表 2。显然,与研究区土壤酸解烃的相应指标相比较,土壤游离烃的每个指标的浓

度相当低。就甲烷、乙烷、丙烷、丁烷和戊烷的平均浓度而言,土壤游离烃与土壤酸解烃的数值分别为:6.90、0.11、0.03、0.005、0.002 (10⁻⁶) 和 546.29、25.23、

表 1 地球化学指标与分析仪器
Table 1 Geochemical parameters and analytic instruments

指标	仪器型号	产地
游离烃(C ₁ ~C ₅)	HP5890 II 气相色谱仪	美国
酸解烃(C ₁ ~C ₅)	HP5890 II 气相色谱仪	美国
ΔC	GC-14A 气相色谱仪	日本
Hg	XG-4 数字汞蒸气分析仪	中国

表 2 研究区指标地球化学参数特征
Table 2 Characteristics of geochemical parameters in the study area

指标	最小值	最大值	均值	标准离差	变异系数	样品数
f-C ₁	1.28	113.2	6.9	7.74	1.12	1041
f-C ₂	0	7.45	0.11	0.49	4.45	1041
f-C ₃	0	1.18	0.03	0.13	4.33	1041
f-C ₄	0	1.05	0.005	0.19	38	1041
f-C ₅	0	2.56	0.002	1.02	510	1041
a-C ₁	46.94	1395.4	546.29	168.35	0.31	1041
a-C ₂	1.4	71.4	25.23	9.07	0.36	1041
a-C ₃	0.95	20.46	7.07	2.61	0.37	1041
a-C ₄	0	8.62	3.39	1.43	0.42	1041
a-C ₅	0	5.38	1.26	0.73	0.58	1041
ΔC	0.002	0.95	0.14	0.1	0.71	1041
Hg	2.3	14.48	3.65	0.8	0.22	1041

注: f-C₁=土壤游离甲烷; f-C₂=土壤游离乙烷; f-C₃=土壤游离丙烷; f-C₄=土壤游离丁烷; f-C₅=土壤游离戊烷; a-C₁=土壤酸解甲烷; a-C₂=土壤酸解乙烷; a-C₃=土壤酸解丙烷; a-C₄=土壤酸解丁烷; a-C₅=土壤酸解戊烷; 游离烃含量为 10⁻⁶,酸解烃单位为 μL/kg,ΔC 含量为 %, Hg 含量为 10⁻⁹

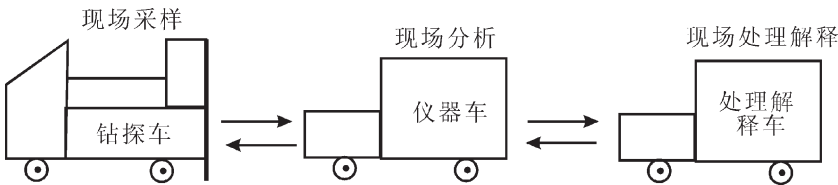


图 2 现场工作简图
Fig. 2 Sketch diagram of site work

7.07、3.39、1.26(μL/kg)。就变异系数而言,游离烃的各指标显著大于相应的酸解烃指标,尤其是重烃(乙烷、丙烷、丁烷和戊烷),但游离烃和酸解烃的变异系数值均由甲烷至戊烷增高。这表明,游离烃相对酸解烃、重烃相对轻烃(CH₄)具有区别异常的优势。因此,游离烃异常比酸解烃异常更可靠,两者的重烃异常皆比轻烃异常更可靠。

研究区 ΔC 的浓度相对低,其最小值、最大值和均值分别仅为 0.002%、0.95%和 0.14%,而其变异系数稍大,为 0.71。研究区 Hg 的浓度也低,其最小值、最大值和均值分别为 2.30×10⁻⁹、14.48×10⁻⁹ 和 3.65×10⁻⁹,同时其变异系数低,仅 0.22。

由于研究区景观单一、土壤类型一致,因此地貌是影响指标浓度的可能因素。但研究区不同地貌的酸解烃、ΔC 和 Hg 的平均浓度统计结果(表 3)显示,这些指标几乎不受地貌的影响。因此,研究区各指标浓度的显著变化应当归因于地下地质因素,尤其是与之有关的地下油气藏、断层或裂缝及微裂隙。

谢学锦等^[15]已认识到,利用多参数方法,弱的油气藏的地表信号可能增强,地表异常与地下油气垂向相关性的不确定性可能减小。为了合理地提取多参数的综合异常,对研究区 12 个参数(1041 个样品)进行了 R-因子分析,前 4 个主要因子的累计变化贡献为 78.50%(表 4)。土壤酸解烃(a-C₁~a-C₅)全部高负载于 F₁, 它们的因子负载分别为 0.854、0.934、0.962、0.928 和 0.758;而其他参数在 F₁ 上的因子负载均很低,小于 0.120。所以 F₁ 主要代表了土壤酸解烃的变量组合。土壤游离烃(f-C₁~f-C₅)全部高负载于 F₂, 它们的因子负载分别为 0.844、0.825、0.792、0.718 和 0.496; 其他参数在 F₂ 上的因子负载小于 0.082。这说明,F₂ 代表了土壤游离烃的变量组合。ΔC 和 Hg 分别高负载于 F₃ 和 F₄,在 F₃ 和 F₄ 上的因子负载分别为 0.744 和 0.738。这样,F₃ 主要代表了 ΔC,F₄ 主要代表了 Hg 变量。这样,12 个指标

表 4 地球化学指标的 R-因子分析结果
Table 4 Analytic results of R indicator of geochemical parameters

变量	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄
a-C ₁	0.854	-0.082	-0.058	-0.044
a-C ₂	0.934	-0.042	-0.003	-0.015
a-C ₃	0.962	-0.014	-0.011	0.024
a-C ₄	0.928	0.065	-0.035	0.125
a-C ₅	0.758	0.034	-0.004	0.128
f-C ₁	0.003	0.844	-0.086	-0.072
f-C ₂	0.012	0.825	-0.056	-0.036
f-C ₃	0.011	0.792	-0.113	-0.012
f-C ₄	0.026	0.718	0.182	-0.168
f-C ₅	0.084	0.496	0.352	-0.028
ΔC	0.082	-0.021	0.744	-0.125
Hg	0.121	0.006	0.438	0.738
变量贡献/%	32.06	25.08	11.92	9.44
累积变量贡献/%	32.06	57.14	69.06	78.5

注:每个指标的含义和单位与表 2 相同

的地球化学异常就可以用游离烃组合异常、酸解烃组合异常、ΔC 异常和 Hg 异常来表达。游离烃和酸解烃组合异常通过 MAV 方法获得,该方法由谢学锦根据多参数地球化学勘探的特征提出。用于计算多参数组合异常值的公式如下:

$$C_{MAV}=\sqrt{\left(\frac{x_1^2+x_2^2+x_3^2+x_4^2+x_5^2}{5}\right)}$$

(1)

式中:x₁、x₂、x₃、x₄、x₅ 分别为土壤酸解或游离甲烷、乙烷、丙烷、丁烷和戊烷的标准化因子,C_{MAV} 即为多参数综合异常值。

该处理方法可避免单个指标异常简单叠合造成异常不清的现象,对增强多参数异常的规律性具有良好的效果^[16]。每个指标的背景值利用稳健统计方法计算,单个指标的异常下限利用下列公式确定:

$$X_a=X_b+nS$$

(2)

式中:X_a 是单指标的异常下限值,X_b 是单指标的背景值,S 是单指标的标准离差,n 是经验系数,本研究中为 1.8。

油气田上方存在不同的地球化学异常形态,典型的形态包括环状、半环状、顶状、偏心状等^[15]。图 3 显示了土壤游离烃的组合异常。可见,大多数显著的

表 3 不同地貌区酸解烃、ΔC 和 Hg 的平均浓度

Table 3 Average concentration of acid hydrocarbons, ΔC and Hg in different topographic area

指标	a-C ₁	a-C ₂	a-C ₃	a-C ₄	a-C ₅	ΔC	Hg	样品数
平坦沙地	578.5	25.25	6.99	3.43	1.18	0.15	3.38	83
沙丘	543.49	25.23	7.08	3.39	1.27	0.14	3.67	958

注:每个指标的含义和单位与表 2 相同

组合异常位于 TD-2 构造的西南部,该构造东北部分布零星的组合异常。把土壤游离烃组合异常的分布特征与 TD-2 地震勘探的 Tg8 构造面进行对比发现,组合异常很明显呈断开的环状和半环状,围绕 Tg8 构造面的圈闭分布,尤其围绕西南圈闭。

土壤酸解烃组合异常主要位于 TD-2 构造的中部,在该构造的东北部,组合异常零星分布。总体而言,位于中部的组合异常呈顶状分布于 TD-2 构造 Tg8 构造面的西南圈闭之上。

ΔC 异常和 Hg 异常均呈断开的环状,围绕 TD-2 构造 Tg8 构造面的 2 个圈闭分布,但出现的位置彼此不一致,与土壤游离烃组合异常的位置也不一致。另外, ΔC 在 Tg8 构造面的 2 个圈闭上方也显示顶状异常。

4 TD-2 构造油气潜力评价

根据实际资料,由地下油气藏运移至近地表的烃类气体(源自烃源岩热解作用)从甲烷至戊烷浓度降低;而由污染或烃源岩暴露等引起的烃类气体,其组分中不具有上述特征^[4]。分析结果和表 1 的统计结果显示,在 TD-2 构造上,土壤游离烃和酸解烃全部具有从甲烷至戊烷浓度降低的明显变化规律。另外,土壤游离烃组分之间和酸解烃组分之间高的

相关性,以及近地表地球化学异常与 TD-2 构造局部圈闭之间的良好对应关系,也说明近地表烃类异常和其他非烃类指标异常与地下油气藏的运移有关。有关研究结果证实,近地表烃类的 $C_1/(C_2+C_3)$ 比值小于 50,是地下热成因油气的结果,若该比值大于 1000,则完全是地表生物成因的结果。在 TD-2 构造上,近地表土壤游离烃和酸解烃的 $C_1/(C_2+C_3)$ 比值均小于 50,表明近地表的烃类具有热成因的特性。

Jones 等^[8]提出,土壤烃气的组分常反映着地下存在的烃类组分。表 5 显示了他们发现的土壤气轻烃不同组合与生产潜力之间的经验关系。TD-2 构造的土壤游离烃甲烷/乙烷、1000×丙烷/甲烷和气体湿度也列于表 5。显然,TD-2 构造土壤游离烃的这

表 5 具鉴别意义的土壤气比率

Table 5 Diagnostic soil-gas ratios

期望产物	甲烷/乙烷	(丙烷/甲烷)×1000	气体湿度/%
dry gas	200~20	2~20	0~5
mixed	20~10	20~60	5~25
oil	10~4	60~500	25~55
研究区	39	9.9	3.4

注:经验值据参考文献[8]

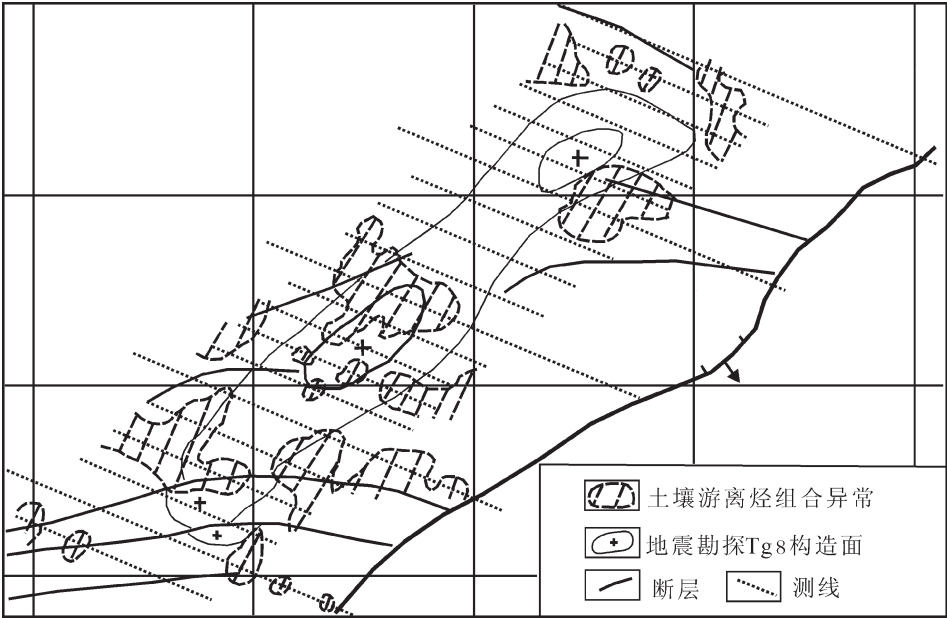


图 3 TD-2 构造区土壤游离烃组合异常与地震勘探 Tg8 构造面综合图

Fig. 3 Anomaly of free hydrocarbon combination of TD-2 structure zone and integrated map of Tg8 structure using seismic exploration

些特征比值,与干气的结果相似。这与区域构造演化 and 邻区的钻探结果^[17]相吻合。

根据黄传波^[18]的研究,寒武系和下奥陶统黑色碳酸盐岩和泥岩在塔里木盆地东部广泛分布,其有机质丰度在 0.5%~2.67%之间,并处于高一过成熟阶段。寒武系烃源岩的有机质丰度很高,在 2.91%~5.52%之间,处于过一高成熟阶段。虽然中—上奥陶统有机质的丰度相对低,但厚度大,仍具有良好的生排烃潜力。TD-2 构造主要形成于加里东和海西期,主要生排烃时期在中—晚奥陶世^[17],因此 TD-2 构造的局部圈闭能有效地聚集油气。在白垩系沉积之前,TD-2 构造没有遭到明显的破坏,因此,当研究区外围的志留系—奥陶系烃源岩经历二次热演化和进入过一高成熟阶段时,便可进一步捕获干气^[14]。

根据上面的分析,笔者认为研究区近地表的烃类异常、 ΔC 异常和 Hg 异常,应该是地下干气藏近垂向运移的结果。

陈远荣等^[9]已证实近地表地球化学异常形态取决于地下油气藏的逸散阶段。如前面所描述的那样,TD-2 构造近地表地球化学异常的形态为断开的环状或顶状。这可能暗示 TD-2 构造的干气藏处于早—中逸散阶段。因此,TD-2 构造应当具有一定的油气潜力,最佳的钻井位置应首先部署在 TD-2 构造的西南局部圈闭上。

5 结 论

根据油气化探的回顾和在沙漠区的实际应用结果,得出如下结论。

(1)近地表油气化探成功的关键,是减少或充分考虑影响近地表地球化学异常的可能因素,利用多参数勘探可增强油气藏的弱地表信息,减少地下油气藏与地表异常垂向相关性的不确定性。

(2)在沙漠区,影响近地表地球化学异常的主要因素是地下水位和地表沙土的活动性。因此,采样深度是关键问题,在开展正式的地球化学勘探之前,应当通过采样深度试验来确定采样深度。

(3)在 TD-2 构造上,因土壤游离烃具有相对较大的变异系数,具有区别异常的优势,故在指示地下油气藏方面,土壤游离烃指标明显好于其他指标。同时,土壤游离烃能在野外现场测定,能真正体现地球化学勘探快速的特点。

(4)近地表地球化学异常的形态、烃组分的浓度

特征和地球化学特征比值,说明 TD-2 构造为一个含气构造,处于早—中期逸散阶段,应当具有一定的油气潜力。

致谢:在研究工作中得到中国石油塔里木盆地石油勘探与开发指挥部的大力支持,论文撰写得到吴锡生教授、吴传璧教授的指导,审稿专家也提出了建设性的修改意见,在此一并深表谢意。

参考文献

- [1] Sokolov V A. New prospecting method for petroleum and gas [J]. Technika, February Bull., NGRI No.1, 1993.
- [2] Laubmeyer G. A new geophysical prospecting method, especially for deposits of hydrocarbons [J]. Petroleum, 1933, 29: 1-4.
- [3] Horvitz L. On geochemical prospecting [J]. Geophysics, 1939, 4: 210-225.
- [4] Rosaire E E. Geochemical prospecting for petroleum [J]. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull., 1940, 24: 1401-1433.
- [5] 吴学明, 赵文献. 国外油气化探新进展 [J]. 石油勘探与开发, 1995, 22 (2): 34-37.
- [6] Hinkle M E, Ryder J L. Effect of moisture and carbon dioxide on concentrations of helium in soils and soil gases [J]. J. Geophys. Res., 1987, 92(B12): 12587-12594.
- [7] Xie Xuejing. Local and regional surface geochemical exploration for oil and gas [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1992, 42: 25-42.
- [8] Jones V T, Drozd R J. Predictions of oil and gas potential by near-surface geochemistry [J]. Am. Assoc. Geol. Bull., 1983, 67(6): 932-952.
- [9] 陈远荣, 戴塔根. 浅论油气藏的逸散史与油气化探异常模式 [J]. 地质与勘探, 1999, 35(6): 71-73.
- [10] Philp R P, Crisp P T. Surface geochemical methods used for oil and gas prospecting—A review [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1982, 17: 1-34.
- [11] Meyer R F. New methods for oil exploration [J]. Anal. Chem., 1965, 37: 27-37.
- [12] 杨玉斌, 张金来, 吴学明. 油气化探 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1995: 13-60.
- [13] 李景朝. 油气化探异常的多参数评价方法与应用结果 [J]. 长春科技大学, 1998, 28(3): 288-295.
- [14] 李志明, 宋喜林, 张长江. 游离烃技术在沙漠覆盖区构造含油气评价中的应用 [J]. 物探与化探, 2002, 26(5): 344-346.
- [15] Xie Xuejing, Yang Binzhong. Application of multiparametric geochemical methods in the search for oil in the Qinggang region near Daqing Oil Field [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1989, 33: 203-213.
- [16] 吴锡生. 化探数据处理方法 [M]. 北京: 地质出版社, 1993: 83.
- [17] 吴国干, 李华启, 初宝洁, 等. 塔里木盆地东部大地构造演化与油气成藏 [J]. 大地构造与成矿学, 2002, 26(3): 229-234.
- [18] 黄传波. 塔里木盆地寒武—奥陶系碳酸盐岩油气藏形成条件 [J]. 新疆石油地质, 2000, 21(3): 188-192.