

文章编号:0253-9985(2010)06-0838-09

地球化学参数在油气运移研究中的应用

——以塔里木盆地塔中地区为例

吕修祥^{1,2}, 杨海军³, 王 祥^{1,2}, 韩剑发³, 白忠凯^{1,2}(1. 中国石油大学 地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;
3. 中国石油天然气股份有限公司 塔里木油田分公司 石油勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:以塔中地区为例,根据饱和烃、芳烃、含氮化合物、流体包裹体微量元素等参数的分析资料,运用地球化学追踪技术方法研究油气运移特征,证实在该区内油气垂向运移和侧向运移的普遍性。塔中地区断裂活动为油气垂向运移提供了有效通道,不整合面和连通性砂体为油气侧向运移提供了通道。实践表明,将地球化学资料与地质特征分析相结合,研究油气垂向运移,分析断裂活动史,以断裂为线索,立足多目的层部署,可以提高塔中地区勘探成功率。对油气侧向运移的输导体系的研究表明,有一定构造背景的优质储层是侧向运移的优势通道,选择的层段相对构造高部位是以侧向运移为主的有利油气聚集区。

关键词:油气运移;示踪参数;地球化学;塔中地区;塔里木盆地

中图分类号:TE122.1 **文献标识码:**A

Application of geochemical parameters in hydrocarbon migration studies: taking Tazhong area of the Tarim Basin as an example

Lü Xiuxiang^{1,2}, Yang Haijun³, Wang Xiang^{1,2}, Han Jianfa³ and Bai Zhongkai^{1,2}

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. Petroleum Exploration and Development Research Institute, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang 841000, China)

Abstract: Hydrocarbon migration in the Tazhong area of Tarim Basin is studied through geochemical tracing based on analyses of saturated hydrocarbons, aromatic compounds, nitrogenous compounds and trace elements of fluid inclusions. The result reveals that both vertical and lateral hydrocarbon migration are common in the study area. Faults here are the effective vertical migration pathways, while unconformities and connected sand bodies serve as the lateral migration pathways. The exploration success rate can be improved by studying vertical hydrocarbon migration through integration of geochemical data with geological data and selecting multiple targets based on an analysis of faulting history. Analysis of lateral carrier systems for lateral hydrocarbon migration indicates that excellent reservoirs with certain tectonic settings are dominant pathways for lateral hydrocarbon migration. Therefore, the relative structural highs of these quality reservoirs are favorable for hydrocarbon accumulation through lateral migration.

Key words: hydrocarbon migration, tracing parameter, geochemistry, Tazhong area, Tarim Basin

油气二次运移的距离小到几毫米,远至数百 米或数千米^[1],而在输导层中真正被油所饱和的

收稿日期:2010-04-12。

第一作者简介:吕修祥(1963—),男,教授,石油与天然气地质。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2005CB422108);国家自然科学基金项目(40672092);国家科技重大专项(2008ZX05004-004)。

部分仅占输导层总体积的1%~10%^[2]。油气运移路径和方向对于确认有利富集区至关重要,但难度极大,一直是石油地质学的薄弱环节^[3],长期以来,许多学者以不同角度或方法开展了大量研究^[4~6]。随着勘探程度的提高,探井数量越来越多,使获取大量的井下原油及流体包裹体样品成为可能。近年来国内外由于实验技术的进一步提高与精确,地球化学追踪技术在油气运移的研究上有了突飞猛进的发展^[7~11]。塔里木盆地塔中地区目前发现的油气来自寒武系、奥陶系两套烃源岩^[12~14],形成垂向上包括寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系和石炭系的多含油气层系,横向上多类型圈闭含油,尤其是奥陶系准层状连片含油、平面上油水井间互的特点,反映了油气运移的普遍性和复杂性。油气运移的通道一般认为是断裂和不整合面^[15,16],但多限于推论,本文试图从地球化学的角度寻找一些油气垂向及侧向运移的证据。

1 区域地质背景

塔中地区位于塔里木盆地的中央隆起部位,包括塔中低凸起、满加尔凹陷南部和塘古孜巴斯凹陷北部(图1)。该区在前震旦系结晶变质基底之上相继发育了震旦系、寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系、白垩系、第三系以及第四系,普遍缺失侏罗系。受加里东运动、海西运动、印支运动、燕山运动和喜马拉雅运动等多期构造运动影响,在前志留系顶部界面、前上泥盆统-石炭系顶部界面和下奥陶统顶部界面形成了多套沉积盖层。圈闭类型也多种多样,在隆起较高部位以各种背斜型、潜山风化壳型圈闭为主,斜坡部位则发育了低幅度背斜和地层等圈闭类型。

塔中地区由北而南主要的大型断裂有塔中Ⅰ号断裂带、塔中10井断裂带和中央背冲断裂带。整个断裂体系在平面上向西撒开,向东收敛,总体

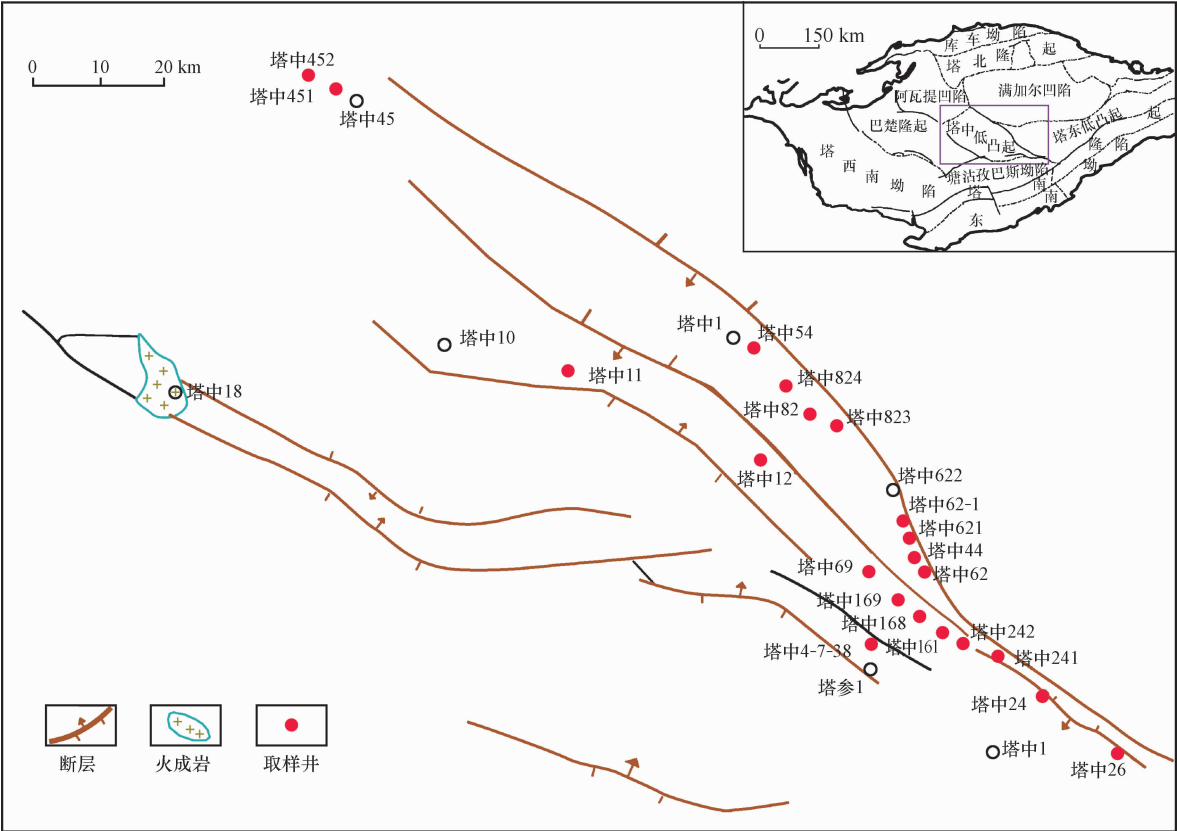


图1 塔中地区构造位置和主要断裂分布

Fig. 1 Structural location of Tazhong area and distribution of the major faults

上具有呈帚状或“鸟足”状的展布特征。主体构造走向为北西、北西西向,并具右旋压扭特征。

结合区域构造背景,通过地震和钻井资料研究表明,塔中地区主要发育 3 大区域不整合,即 $T_g^{5''}$ (中、上奥陶统-下奥陶统)、 $T_g^{5'}$ (上奥陶统颗粒灰岩顶面)、 T_g^5 (志留系底面反射)(图 2)。不整合界面上、下岩性接触关系主要有碎屑岩/碎屑岩、碎屑岩/灰岩和碎屑岩/白云岩等几种主要的岩性接触类型。塔中北部地区,志留系不整合于桑塔木组泥岩之上,下伏的上奥陶统桑塔木组泥岩段仍有发育;塔中中部地区,志留系直接上覆于上奥陶统良里塔格组颗粒灰岩段之上;至塔中南部,志留系、泥盆系和中、上奥陶统也被剥蚀殆尽,石炭系直接上覆于下奥陶统上丘里塔格群之上,不整合界面上、下地层产状基本相同。

垂向上,能将寒武-奥陶系烃源层与多个目的层联系起来的有效输导体系是断裂。除图 1 中二维地震易于识别的逆冲断裂外,随着三维地震资料的采集和处理,新识别出一系列北东走向的走滑断裂,这些断裂中的部分也是油气垂向运移的有效通道^[17,18]。而平面上大面积含油气,经典的实例是奥陶系鹰山组风化壳含油气层,其与不整合面的侧向输导有密切的关系。因此,断裂和不整合面构成油气输导的主体格架,碳酸盐岩层的裂缝以及溶洞、碎屑岩层的连通性砂体参与了油气进一步的运移和分配。

2 地球化学参数判断油气运移方向

2.1 饱和烃

2.1.1 正构烷烃

由于油气在运移过程中会发生“地质色层”效应,正构烷烃中相对短链、小分子量化合物较之长链、大分子量的 nC_{28} 和 nC_{29} 易于运移,并顺着运移方向相对地富集,认为 $(nC_{21}^- + nC_{22}^+)/ (nC_{28} + nC_{29})$ 会顺着原油运移方向增大。同理, nC_{21}^-/nC_{22}^+ 比值也会增大。

在塔中地区的不同井区奥陶系碳酸盐岩层系中,随着深度从深到浅的变化, nC_{21}^-/nC_{22}^+ 比值逐渐增大。如在塔中东部的 26 井, nC_{21}^-/nC_{22}^+ 比值则随深度变浅,由 18 增大到 20.21(图 3a)。在塔中西部的塔中 451 井、塔中 452 井以及塔中 44 井也有类似的变化规律(图 3b,c,d)。多口井的参数变化显示,在奥陶系和志留系之间,由深到浅的垂向运移效应较为明显。

2.1.2 萜烷类化合物

三环萜烷和五环三萜烷是原油中最常见的组分,抗生物降解的能力强,只有在其遭受强烈的生物降解后才受到影响。在大量的萜烷系列化合物参数中, $C_{29}Ts/(C_{29}Ts + 17\alpha - C_{29}降藿烷)$ 、 $Ts/(Ts + Tm)$ 和三环萜烷/[三环萜烷 + $17\alpha(H) - 藿烷$] 等参数常用于示踪石油运移和充注过程。

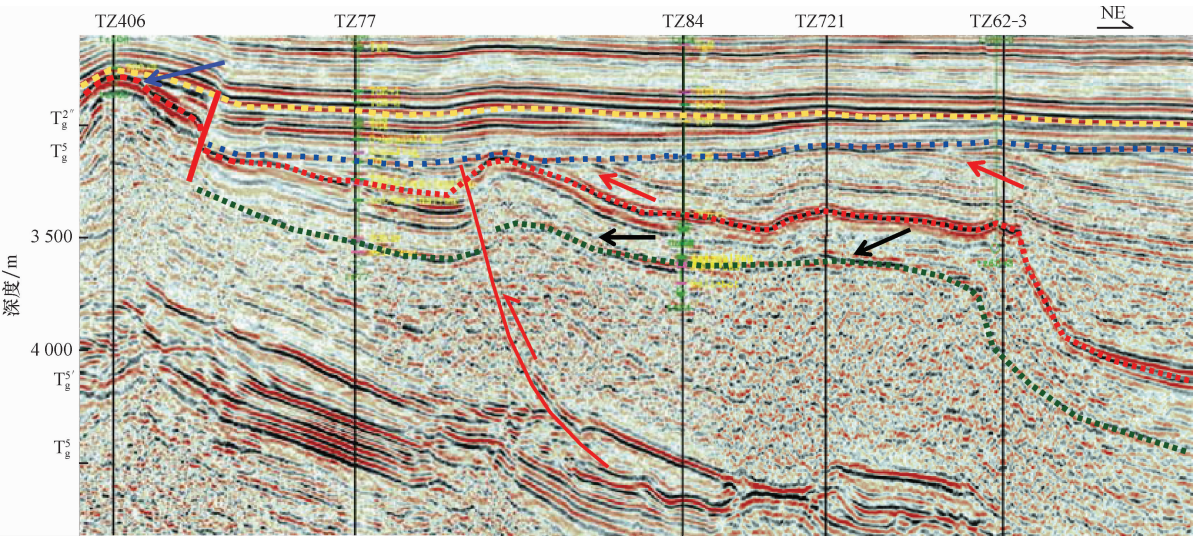


图 2 塔中地区主要不整合特征
Fig. 2 Characteristics of the main unconformities in Tazhong area

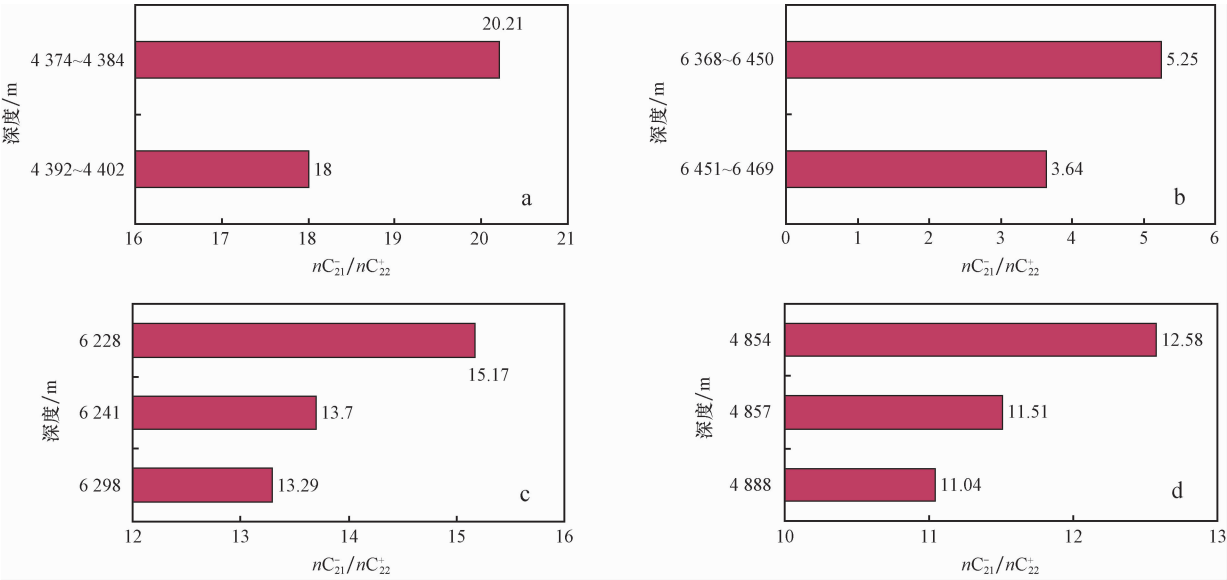


图3 塔中地区原油 nC_{21-}/nC_{22+} 比值变化特征

Fig. 3 Variation of nC_{21-}/nC_{22+} ratio of crude oil samples from Tazhong area

a. 塔中26井; b. 塔中452井; c. 塔中451井; d. 塔中44井

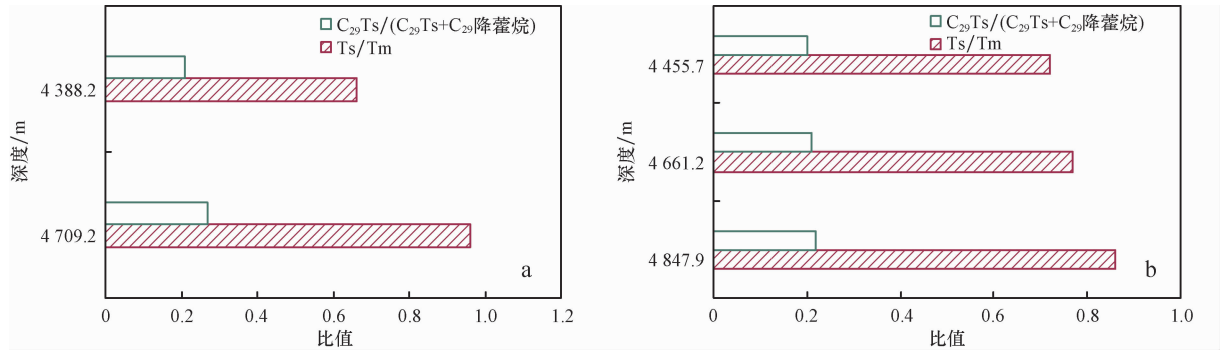


图4 塔中地区储层抽提物萜烷参数变化特征

Fig. 4 Variation of terpanes parameters of extracts gathered from reservoirs in Tazhong area

a. 塔中12井; b. 塔中11井

$C_{29}Ts/(C_{29}Ts + 17\alpha - C_{29}降藿烷)$ 、 Ts/Tm 和三环萜烷/[三环萜烷 + $17\alpha(H) - 藿烷$]参数比值随着运移距离的增加而减小。通过对塔中多口井的不同深度所赋存的储层抽提物样品的成熟度参数分析, Ts/Tm 和 $C_{29}Ts/(C_{29}Ts + 17\alpha - C_{29}降藿烷)$ 比值从奥陶系到志留系都有减小的趋势(图4),说明油气经由奥陶系中的输导通道向志留系发生了运移。

2.2 芳烃化合物

随着成熟度的增加,芳烃系列化合物的组成与结构将发生一定的变化,可以利用芳烃化合物之间的比值来反映成熟度的变化。基于分子结构的热稳定性以及氢键形成机理,王铁冠等(2005)^[19]认为

烷基二苯并噻吩类参数 $4 - MDBT/1 - MDBT$ ($MD - BT$ 为甲基二苯并噻吩), $DMDBT_2, 4 - DMDBT/1, 4 - DMDBT$ ($DMDBT$ 为二甲基二苯并噻吩) 和 $4, 6 - DMDBT/1, 4 - DMDBT$ 具备表征有机质成熟度以及油气运移的属性,可以作为示踪油藏充注方向与途径的有效分子参数。随着运移距离增加,上述参数是减小的。塔中地区多口井的奥陶系和志留系储层抽提物中 $2, 4 - DMDBT/1, 4 - DMDBT$ 的比值、 $4, 6 - DMDBT/1, 4 - DMDBT$ 的比值和 $4 - MDBT/1 - MDBT$ 的比值在总体上都表现为随着埋藏深度的变浅而递减这一规律性的变化趋势(图5),证实了塔中地区的油气经过了碳酸盐岩中的输导体系而实现了从奥陶系向上至志留系中的运移。

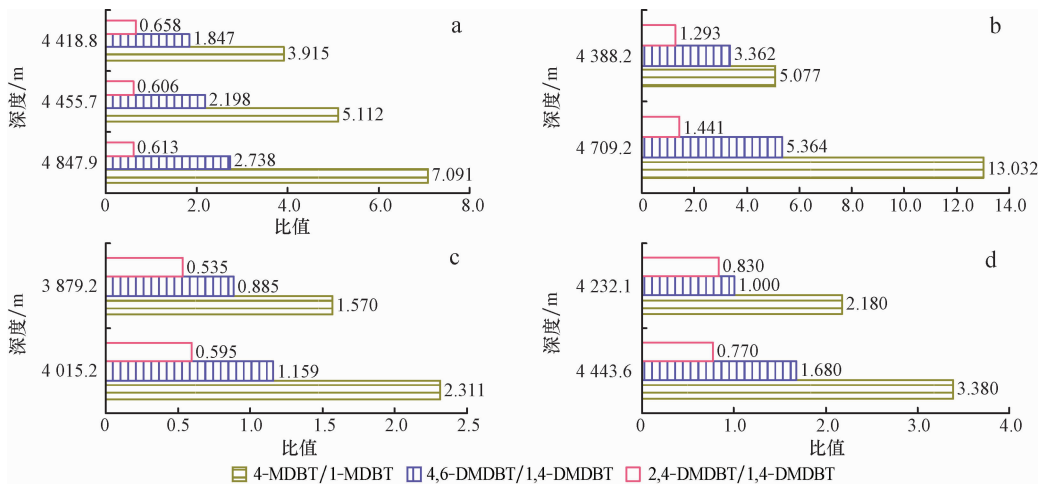


图 5 塔中地区抽提物的二苯并噻吩 (DBT) 成熟度参数随深度变化特征

Fig. 5 DBT maturity of extracts vs. depth in Tazhong area

a. 塔中 11 井; b. 塔中 12 井; c. 塔中 4-7-38 井; d. 塔中 69 井

2.3 含氮化合物

含氮化合物是原油及烃源岩中的一种非烃组分,其含量一般占原油的 0.1%~2.0%。目前,利用含氮化合物的分馏作用已成为研究石油二次运移的一种重要手段。因为,石油在运移过程中,其中具有极性的含氮化合物与围岩表面相互作用,导致其浓度逐渐降低,不同异构体之间的丰度比值会有差异。一般来说,随着油气运移距离的增加,1,8-二甲基咪唑含量逐渐增加,裸露型异构体急剧减少。同时,苯并[a]咪唑相对含量减少,而苯并[c]咪唑相对增加,导致 $[a]/([a]+[c])$ 值降低,那么两个苯并咪唑的异构体比值 $[a]/([a]+[c])$ 数值降低的方向,就是石油运移、油藏充注的指向。可以通过测定含氮化合物在地层中的含量,利用它们之间的比值来确定原油的运移方向^[20,21]。

塔中地区多个代表性的油藏中样品的含氮化合物总量丰度值随着埋藏深度的加大,呈现现有规律性的变化:在同一井中,的不同深度,咪唑类化合物总量存在明显差异,赋存深度较大的样品其含氮化合物总量数值较大,较浅的测试样品的含氮化合物总量数值则相对较小(图 6a,图 b)。表明在某一地质历史时期中,塔中地区的油气经由奥陶系向志留系发生了较为明显的垂向运移。此外,所选取的 1,8-DMCA/1,7-DMCA 和 1,8-DMCA/2,7-DMCA (DMCA 为二甲基咪唑) 参数比值则随着埋深变浅而增大(图 6c,d),进一步说明了油气由奥陶系向志留系发生了明显的垂向

运移。在侧向运移研究方面,含氮化合物总量随着运移距离的增加而逐渐减小。在塔中 62 井区,从塔中 62-1 井到塔中 62 井,奥陶系颗粒灰岩段中原油的含氮化合物总量依次减小(图 6e),反映出油气沿塔中 62-1 井—塔中 621 井—塔中 62-2 井—塔中 62 井方向运移的特征。同样,1,8-DMCA/1,7-DMCA 和 1,8-DMCA/1,7-DMCA 参数比值则显示出与含氮化合物总量变化相反的特征(图 6f),这也正体现了与含氮化合物总量所得结论相一致的特征。

2.4 流体包裹体微量元素

流体包裹体也是研究油气运移的重要方法之一,它有着许多其他方法无法比拟的优势。因为包裹体形成后没有外来物质的加入和自身物质的溢出,作为原始的成矿液体来研究,可提供大量地质信息。采用 ICP-MS 和 LA-ICP-MS 探测石英群体包裹体的稀土元素、成矿元素和单个包裹体的微量元素组成^[22-28],笔者等尝试采用 ICP-MS 测定塔里木盆地塔中东部地区志留系沥青砂岩中的群体包裹体的微量元素含量,以期借助包裹体中微量元素的变化指示油气运移的方向。

塔中 16 井区的单个微量元素 Ni, Cu, Al 和 Ti 的含量变化和多个元素组的含量变化规律明显,其含量从靠近塔中 I 号构造带的塔中 69 井和塔中 10 号构造带的塔中 15 井向志留系地层尖灭线方向的塔中 16、塔中 161 井增加(图 7),从而证实

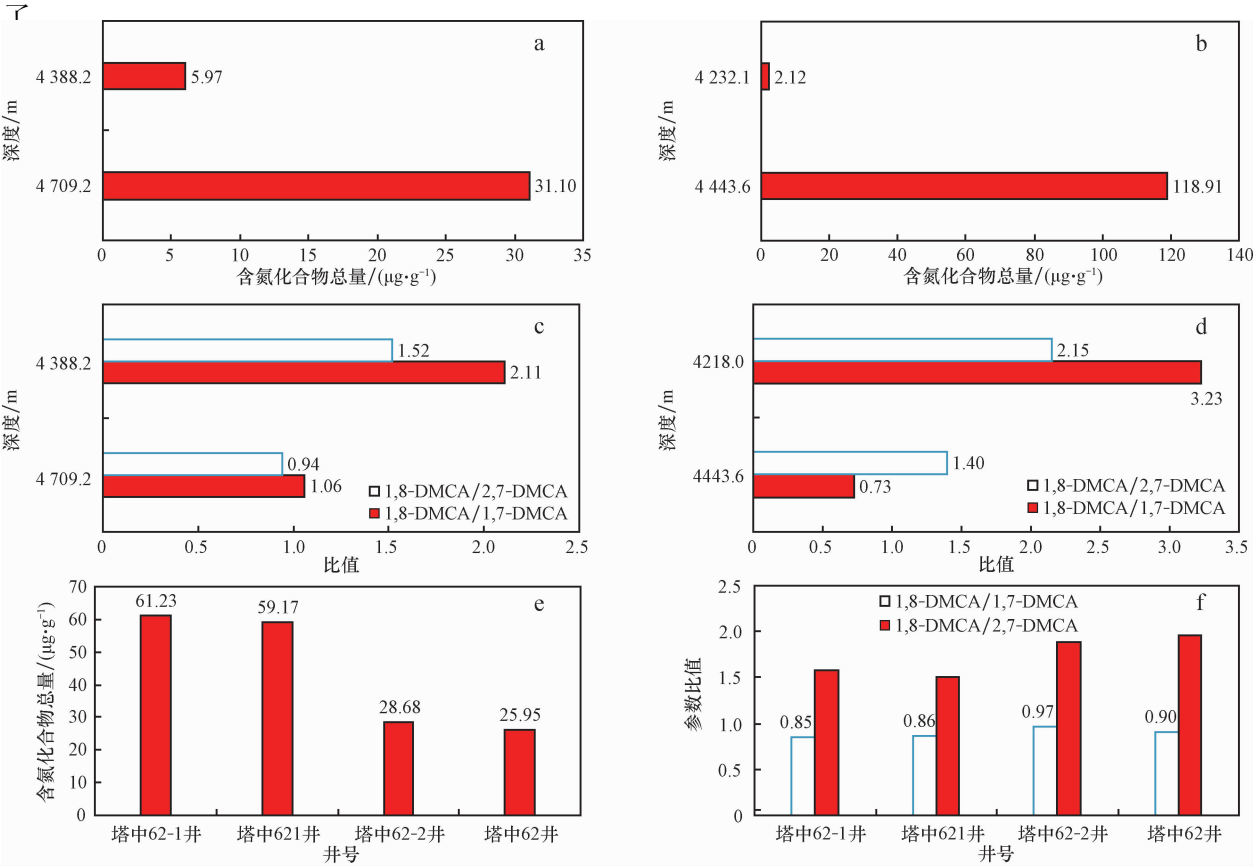


图6 塔中地区含氮化合物总量和参数变化特征

Fig. 6 Variation of total nitrogenous compounds and relative parameters of crude oil samples from Tazhong area
a. 塔中12井;b. 塔中69井;c. 塔中12井;d. 塔中69井

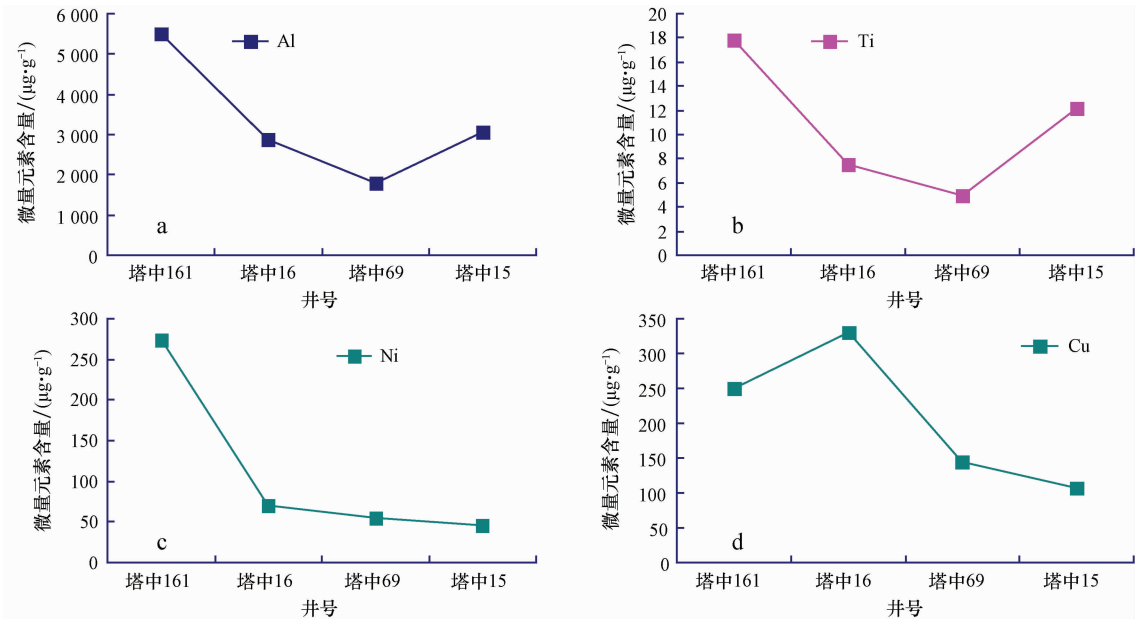


图7 塔中16井区单个微量元素含量变化趋势

Fig. 7 Variation of the content of some trace elements in samples from Tazhong-16 welllock in Tazhong area

油气向地层尖灭方向的运移。Ni + B, Na + Li + Ca + Mg + Sr + Ba, Ce + La + Pr + Nd, Ti + Zr + Hf + Nb + Y, Fe + Mn + Mo + As + Ge 这 5 个元素组也反映出类似的规律变化(图 8)。

3 结论与讨论

3.1 油气运移示踪地球化学指标的应用必需与地质特征相结合

虽然油气运移示踪方法、参数在油气勘探领域的应用已取得了很大的进展,并且也达到了良好的效果,但研究中仍然会遇到各参数方法所得结论相矛盾的问题。如从塔中 402 到塔中 4 方向,含氮化合物 G1(屏蔽型)相对含量从 25.7%增加到 29.4%,G3(裸露型)相对含量从 39.7%下降到 34.9%。上述两个参数的变化趋势表明石

炭系 CⅢ油层中发生了从塔中 402 到塔中 4 方向的油气运移。然而,根据含氮化合物 1,8 - DMCA/1,7 - DMCA、1,8 - DMCA/2,7 - DMCA、1,8 - DMCA/部分屏蔽型、1,8 - DMCA/裸露型化合物等参数的变化趋势(图 9),却得出了油气运移方向相反的结论。之所以出现这种问题,主要与一些需要考虑的地质因素有关。

3.1.1 油源对运移方向判断的影响

单一油-气源是指油气是由某一套烃源岩生成的,在封闭系统内运移时发生地层吸附作用。随着运移距离的增加,原油中沥青质、非烃和芳烃含量降低,而饱和烃含量相对增加,各种生物标志物及含氮化合物指标也均会发生明显变化,这也是油气运移研究中较为常见的变化。因此,可以根据原油成熟度特征、生物标志化合物、同位素、含氮化合物以及流体包裹体等指标来分析烃类流体运移路径。

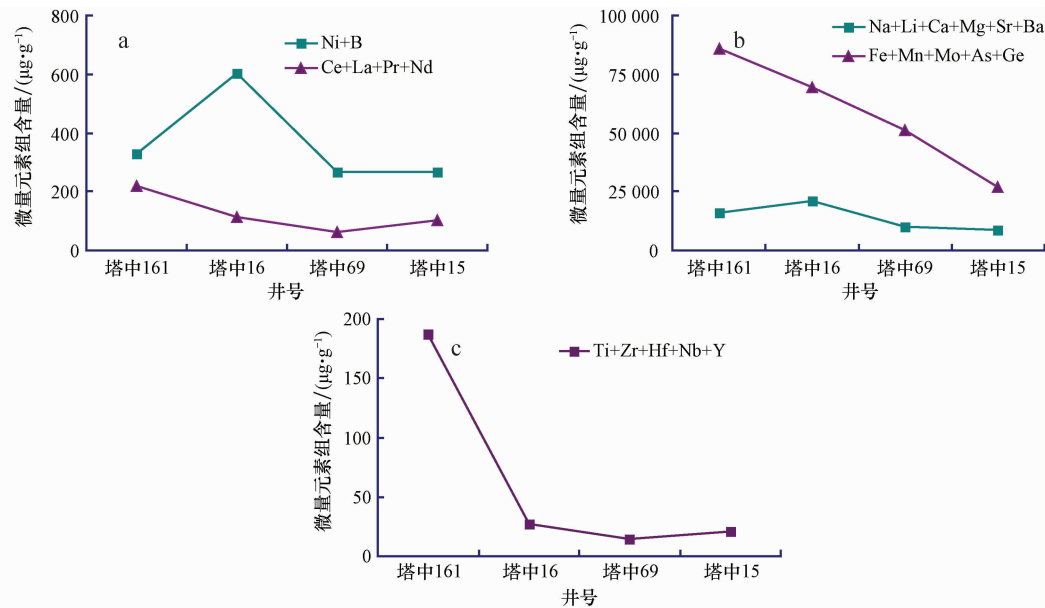


图 8 塔中 16 井区微量元素组含量变化趋势

Fig. 8 Variation of the content of trace element sets in samples from Tazhong-16 welllock in Tazhong area

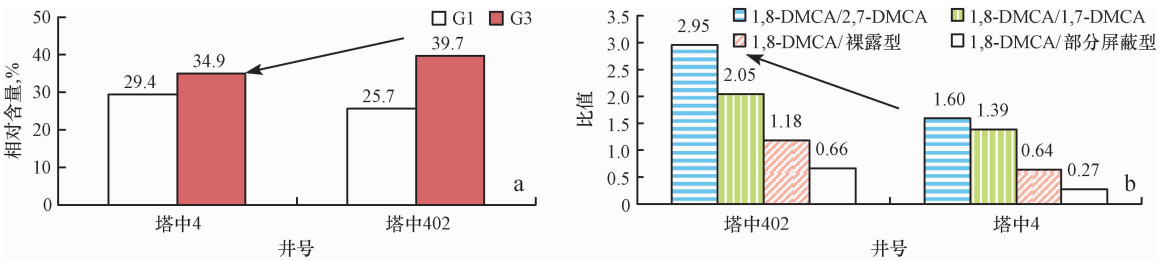


图 9 塔中 4 井区地化参数平面变化特征

Fig. 9 Planar variation of geochemical parameters in Tazhong-4 welllock of Tazhong area

混合油对油气运移判断存在一定难度或多解性。油油混源现象可分为3种:未熟油与成熟油的混合、降解原油与未降解原油的混合、不同源的原油的混合。对于不同成熟度原油的混合,对同一油样根据不同指标进行成熟度分析可以得出不同的成熟度特征;而对于第二种情况,运移方向研究则变得较为困难,因为生物降解原油和未降解原油叠合使原油的性质变得异常复杂,一些常规的运移示踪参数都已失去有效性。不同源的原油混合情况在国外研究较多,在国内这方面的文献则相对较少。由此可见,在进行油气运移路径研究之前,必须要做好油源对比工作,分析考虑同一油藏中原油的混合情况。

3.1.2 次生变化对运移方向判断的影响

油气在运移过程中除与围岩发生地质层效应之外,还经常发生其他一些次生变化使其性质发生根本的变化,比较常见的有生物降解作用、水洗-氧化作用和热化学硫还原作用等。

最明显的生物降解作用是造成原油族组成发生变化,饱和烃含量降低,非烃、沥青质含量明显增加,这一结果与运移过程中原油物性的变化完全相反,从而使得原油物性差异方法在研究运移问题上失去作用。其次,生物降解作用会优先消耗掉正构烷烃、类异戊二烯烷烃,随着降解作用的增强,甾、萜类生物标志化合物也将被消耗,这在很大程度上阻碍了油气运移示踪参数获取途径。最后,生物降解作用对原油中卟啉类化合物的分布也有一定的影响,在轻度降解的原油中卟啉类化合物变化不大,在重度降解原油中,二甲基卟啉、苯并卟啉的相对含量也会发生明显的变化^[29,30]。综上所述,在获取和选择油气运移示踪参数问题上应格外慎重,尽量选择一些抗生物降解能力强的化合物参数。

水洗作用对原油的影响常被生物降解作用所掩盖,Lafargue^[31]认为水洗作用对原油的密度、芳烃含量和稳定同位素等方面有着重要的影响。另外,甾、萜类化合物和芳烃化合物也明显受到水洗作用的影响^[32]。在水洗作用的同时,伴随着氧化效应,使得原油的饱和压力和GOR(油气比)降低,密度和粘度逐渐增加,沥青质、非烃和芳烃含量相对增加,给油气运移参数的应用研究带来了很大的困难。

热化学硫还原作用是指在高温条件下,烃类

接近无水石膏等含硫矿物而产生的硫的非生物还原作用^[33,34]。与热成熟作用相反,随着还原作用的增强,原油中芳烃含量增加,而饱和烃含量降低,同时原油的 $\delta^{13}\text{C}$ 增大,使得油气运移示踪参数的适用性大大缩小。

3.2 从油气运移看有利油气富集层段和地区

多层段含油气是塔中地区的一个基本特点,源与藏的关系以及运移地球化学指标也揭示了油气垂向运移的普遍性。以塔中北坡为例,钻井揭示石炭系含油气层与奥陶系油源层和寒武系气源层的垂直距离一般在2 000~4 000 m,中间有巨厚的桑塔木组(O_3s)泥岩,活动断裂应该是油气垂向运移的重要通道。特别是大型断裂在活动过程中形成宽达数米的断裂破碎带(这种现象在野外可以观察)以及形成的与之相关的派生次级断裂、裂缝使油气垂向运移十分活跃,而塔中地区断裂又十分发育,因此垂向运移十分普遍。因此,从油气垂向运移的角度看,塔中地区还是要立足于多层系勘探,至于哪些层系值得关注,主要还是取决于是否发育优质储层。优质储层发育的层段不仅仅是油气的储集体,同时也是重要的油气侧向运移的输导体系。

志留系沥青砂岩段和奥陶系碳酸盐岩广泛的油气显示证明,塔中地区油气侧向运移十分普遍。而侧向运移的输导体系主要有两类,一是区域性不整合面,如鹰山组(O_{1-2}y)顶不整合面大型准层状油气藏的形成;二是连通性砂体,如志留系下沥青砂岩段广泛的沥青及油气显示(包括工业性油气聚集)。但油气聚集往往是选择有一定构造背景的优质储层,如塔中16井区志留系沥青砂岩段、塔中62井区良里塔格组(O_3l)颗粒灰岩段,地球化学指标的变化趋势清晰地反映了石油由低点向高点的运移轨迹。鹰山组(O_{1-2}y)准层状油气藏也是在局部范围内的低点如中古84井出水、相对高点获高产油气流。

从塔中地区油气运移输导网络体系的构成和目前发现油气分布格局看,以断裂为线索、立足多目的层部署可以增加勘探成功率。但并非所用断裂在任何时期都是油气运移的通道,因此还必须对断裂活动史进行分析。另外,塔中隆起北部斜坡为广泛的油气成藏提供了有利的背景,但平面上在油气井之间有出水井,勘探中避免钻遇水层

而不见油气的有效办法一是立足于寻找相对的构造高点,对砂岩目的层找构造或砂体上倾方向地层岩性圈闭,对碳酸盐岩避开溶蚀沟槽;二是充分利用地球物理资料获得的信息,加强油气检测。

参 考 文 献

1 England W A, Mann D M, Quigley T M. The movement and entrapment of petroleum fluids in the subsurface[J]. Journal of the Geological Society London, 1987, 144: 327 ~ 347

2 Lamer S R, Horstad I. Migration of hydrocarbons into Brent Group reservoirs, some observations from the Gullfaks Fields, Tampen Spur Area North Sea[A]. In: Morton A C, ed. Geology of Brent Group[C]. Geological Society of London Special Publication, 1992, 61: 441 ~ 452

3 金之钧, 张发强. 油气运移研究现状及主要进展[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(3): 263 ~ 270

4 Larter S R. Molecular indicators of secondary oil migration distance[J]. Nature, 1996, 383: 593 ~ 971

5 Masanobu Yamamoto. Fraction of azarenes during oil migration[J]. Org Geochem, 1992, 19(4-6): 389 ~ 402

6 Jin Zhijun, Cao Jian, Hu Wenxuan, et al. Episodic petroleum fluid migration in fault zones of the northwestern Junggar basin (northwest China): evidence from hydrocarbon-bearing zoned calcite cement[J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(9): 1225 ~ 1243

7 Peters K E, Moldowan J M. Effects of source, thermal maturity, and biodegradation on the distribution and isomerization of homohopanes in petroleum[J]. Organic Geochem, 1991, 17(1): 47 ~ 61

8 Curiale J A, Bromley B W. Migration induced compositional change in oils and condensates of a single field[J]. Org Geochem, 1996, 24(12): 1097 ~ 1113

9 George S C, Kreger F W, Eadington P J, et al. Geocada, comparison of oil-bearing fluid inclusions and produced oil from Toro sandstone, Papua New Guinea[J]. Org Geochem, 1997, 26: 155 ~ 173

10 黄海平, 张水昌, 苏爱国. 油气运移聚集过程中的地球化学作用[J]. 石油实验地质, 2001, 23(3): 278 ~ 283

11 王铁冠, 李素梅, 张爱云, 等. 应用含氮化合物探讨新疆轮南油田油气运移[J]. 地质学报, 2000, 74(1): 85 ~ 93

12 张水昌, 张保民, 王飞宇, 等. 塔里木盆地两套海相有效烃源层——(1). 有机质性质、发育环境及控制因素[J]. 自然科学进展, 2001, 11(3): 261 ~ 268

13 梁狄刚, 张水昌, 张宝民, 等. 从塔里木盆地看中国海相生油问题[J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 534 ~ 547

14 杨海军, 韩剑发, 陈利新, 等. 塔中古隆起下古生界碳酸盐岩油气复式成藏特征及模式[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(6): 784 ~ 790

15 付广, 段海凤, 孟庆芬. 不整合及输导油气特征[J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(1): 13 ~ 16

16 魏福军, 高志前, 樊太亮, 等. 塔里木盆地塔中地区输导体系及成藏效应[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(2): 266 ~ 273

17 李明杰, 胡少华, 王庆果, 等. 塔中地区走滑断裂体系的发现及

其地质意义[J]. 石油地球物理勘探, 2006, 41(1): 116 ~ 121

18 张承泽, 于红枫, 张海祖, 等. 走滑断裂塔中地区走滑断裂特征、成因及地质意义[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2008, 30(5): 22 ~ 26

19 王铁冠, 何发岐, 李美俊, 等. 烷基二苯并噻吩类: 示踪油藏充注途径的分子标志物[J]. 科学通报, 2005, 50(2): 176 ~ 182

20 Li M, Larter S R, Stoddart D, et al. Fractionation of pyrrolic nitrogen compounds in petroleum during migration-Derivation of migration related geochemical parameters [A]. In: Rbitt J M, England W A, eds. The Geochemistry of Reservoirs[C], Geological Society Special Publication, 1995, 86: 103 ~ 123

21 Wang T G, Li S M, Zhang S C. Oil migration in the Lunnan region, Tarim Basin, China-based on the pyrrolic nitrogen compound distribution[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2004, 41: 123 ~ 134

22 Audéat A, Günthe D, Heinrich C A. Formation of a magmatic-hydrothermal ore deposit: insights with LA ICP-NN analysis of fluid inclusions[J]. Science, 1998, 279: 2091 ~ 2094

23 邵志兵, 吕海涛, 耿锋. 塔里木盆地麦盖提地区石炭系油藏地球化学特征[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 84 ~ 90

24 吕海涛, 张仲培, 邵志兵, 等. 塔里木盆地巴楚-麦盖提地区早古生代古隆起的演化及其勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 76 ~ 84

25 Loucks R R, Mavrogenes J A. Gold solubility in supercritical hydrothermal brines measured in synthetic fluid inclusions[J]. Science, 1999, 284: 2159 ~ 2163

26 Irich T, Günther D, Heinrich C A. Gold concentrations of magmatic brines and the metal budget of porphyry copper deposits[J]. Nature, 1999, 399: 676 ~ 679

27 苏文超, 漆亮, 胡瑞忠, 等. 流体包裹体中稀土元素的 ICP-MS 分析研究[J]. 科学通报, 1998, 43(10): 1094 ~ 1098

28 李慧莉, 钱一雄, 沙旭光, 等. 塔里木盆地卡塔克隆起西北倾没端里塔格组碳酸盐岩储层发育特征与影响因素[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 69 ~ 75

29 黄海平, 任芳祥, Larter S R. 生物降解作用对原油中苯并咪唑分布的影响[J]. 科学通报, 2002, 47(6): 1271 ~ 1276

30 张春明, 赵红静, 梅博文, 等. 微生物降解对原油中咪唑类化合物的影响[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(4): 341 ~ 345

31 Lafarg U E. Effect of water washing on light end compositional heterogeneity[J]. Org Geochem, 1996, 24: 1141 ~ 1150

32 张敏, 张俊. 水洗作用对油藏中烃类组成的影响[J]. 地球化学, 2000, 29(3): 287 ~ 292

33 张枝焕, 邓祖佑, 吴水平, 等. 石油成藏过程中的地球化学变化及控制因素的综合评述[J]. 高校地质学报, 2003, 9(3): 484 ~ 494

34 韩强, 杨子川, 赵渊. 塔里木盆地轮台地区低幅度构造圈闭落实技术及其应用[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 43 ~ 48