

塔里木盆地塔中Ⅱ区奥陶系油气差异富集模式

李 斌^{1,2}, 赵星星³, 邬光辉^{1,2}, 韩剑发⁴, 关宝珠⁴, 沈春光⁴

(1. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 四川 成都 610500; 2. 西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验, 四川 成都 610500; 3. 中国石油 塔里木油田分公司, 新疆 库尔勒 841000; 4. 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)

摘要: 针对塔里木盆地塔中Ⅱ区奥陶系油气多相态共存、产能差异和富集模式认识不清的问题, 采用油藏地球化学方法分析了奥陶系流体性质、分布特征及成因。油藏 pVT 相态分析认为存在凝析气藏与轻质油藏沿走滑断裂共存的现象, 原油的成熟度参数显示为成熟阶段的产物, 天然气碳同位素和烃类比值揭示组分为原油伴生气和原油裂解气的混合, 金刚烷化合物及天然气分析显示中寒武统盐下原油裂解气的充注是奥陶系凝析气藏形成的重要原因。结合高精度三维地震解释发现油气分布受到走滑断裂的控制, 马尾、翼尾、走滑断裂带与逆冲断裂交汇部位具有较低的原油密度和含蜡量, 以及较高的气/油比、干燥系数、4-MDBT/1-MDBT比值等, 为油气充注的有利通道, 走滑断裂周期性开启与膏盐层封堵机制耦合控制了塔中Ⅱ区奥陶系油气成藏。综合研究认为, 塔中Ⅱ区油气具有侧生邻储、走滑断裂垂向输导、沿走滑断裂富集的特征, 多期点状油气充注是造成奥陶系油气差异分布的重要原因。走滑断裂控制了奥陶系油气富集, 马尾地堑、翼尾地堑、走滑断裂带与逆冲断裂交汇构造部位仍有较大的勘探潜力, 中寒武统膏盐层下可能发育大规模气藏, 需要进一步关注。

关键词: 差异富集; 充注通道; 走滑断裂; 膏盐岩层; 奥陶系; 塔中Ⅱ区; 塔里木盆地

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

Differential hydrocarbon accumulation model of the Ordovician in Tazhong Ⅱ block, Tarim Basin

LI Bin^{1,2}, ZHAO Xingxing³, WU Guanghui^{1,2}, HAN Jianfa⁴, GUAN Baozhu⁴, SHEN Chunguang⁴

(1. School of Earth Science and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. State Key Experiment of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 3. Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China; 4. Exploration and Development Research Institute of Tarim Oilfield Branch Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China)

Abstract: The study aims to analyze the nature, distribution patterns and origin of fluids in the Ordovician by means of reservoir geochemistry, in view of existing problems concerned with coexistence of multiple phases of oil and gas, large difference of productivity and limited knowledge of hydrocarbon enrichment modes of the Ordovician reservoirs in Tazhong Ⅱ block, Tarim Basin. The pressure-volume-temperature (pVT) analysis of the Ordovician reservoir fluids shows that condensate gas reservoirs and light oil reservoirs coexist along strike-slip faults. The crude oil maturity parameters indicate the oil is product of mature stage, and the carbon isotope and hydrocarbon composition ratio of natural gases reveals that the gas is a mixture of the gas associated with the crude oil and oil-cracking gas. The analysis of diamondoid compounds and natural gas shows that the charging of gas from cracking of oil in reservoirs below the Middle Cambrian evaporite layer is an important factor leading to the formation of the Ordovician condensate gas reservoirs. The analysis in combination with 3D seismic interpretation data of high precision indicates that the hydrocarbon distribution is controlled by strike-slip faults, and that the crude oil density and wax content are relatively lower, and gas/oil ratio, drying coefficient and 4-MDBT/1-MDBT ratio are relatively higher in horsetail-type graben, wing tail-type graben and intersection of strike-slip fault and thrust fault which are of favorable channels for hydrocarbon charging. The coupling of the periodical opening of strike-slip

收稿日期:2022-07-18; 修订日期:2022-12-01。

第一作者简介:李斌(1977—),男,博士、副教授,油气成藏。E-mail: lbin@swpu.edu.cn。

基金项目:四川省区域创新合作项目(21QYCX0048)。

faults with the sealing mechanism of evaporite intervals controls the hydrocarbon accumulation of the Ordovician in the study area. It is considered that the hydrocarbon reservoirs in Tazhong Ⅱ block are characterized by juxtaposition of source rock and reservoir, vertical migration and enrichment along strike-slip faults, and multi-stage scattered hydrocarbon charging, all of which are an important reason for the differential hydrocarbon distribution in the Ordovician reservoirs. Strike-slip faults control hydrocarbon accumulation in the Ordovician, and there is great exploration potential in the horsetail-type graben, wing-tail-type graben, and intersection of strike-slip faults and thrust faults. Large-scale gas reservoirs may exist in sequences below the Middle Cambrian evaporite layer, and this is in need of further attention.

Key words: differential accumulation, charging channel, strike-slip fault, evaporite layer, Ordovician, Tazhong Ⅱ block, Tarim Basin

引用格式:李斌,赵星星,邬光辉,等. 塔里木盆地塔中Ⅱ区奥陶系油气差异富集模式[J]. 石油与天然气地质,2023,44(2):308-320. DOI:10.11743/ogg20230205.

LI Bin, ZHAO Xingxing, WU Guanghui, et al. Differential hydrocarbon accumulation model of the Ordovician in Tazhong Ⅱ block, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 308-320. DOI: 10.11743/ogg20230205.

油气的差异富集是深层油气广泛存在的特征,如美国得克萨斯州西部的二叠系盆地、东非深水油气田、滨里海凝析气田等^[1-4],中国的川中龙王庙气藏、黄骅坳陷、顺北奥陶系等。其主要与烃源岩的热演化、油气运移分馏、次生改造、晚期构造调整等因素有关^[5-14],因此,查明油气差异富集的主控因素是深层油气富集规律研究的重要内容。塔里木盆地塔中隆起作为长期发育的继承性古隆起,奥陶系石油地质条件优越,具有巨大的资源潜力^[15-16]。随着对塔中Ⅱ区海相油气勘探开发的不断推进,发现沿断裂带存在多种类型油气藏,且井间产能差异较大,油气藏非均质性突出,油气富集规律复杂。前人对塔中Ⅱ区油气差异分布的认识主要集中于油气运聚及储层非均质性方面的研究^[16],尚存在较大的分歧。部分学者认为油气沿塔中Ⅰ号断裂带侧向充注进入奥陶系储层并运聚成藏^[17],与塔中Ⅱ区油气沿运聚方向分馏效应差存在矛盾,也有学者提出走滑断裂的充注机制^[18],但无法合理解释中寒武统膏盐层对油气垂向运移的影响。鉴于以上问题,本文在前人研究基础上结合高密度三维地震解释资料,油气水及油藏地球化学等相关参数,对塔中Ⅱ区油气差异分布规律及富集模式进行了详细解剖,以期对塔中Ⅱ区超深层油气勘探开发提供新的思路。

1 地质背景

研究区塔中Ⅱ区位于塔中隆起中部,经历了多期构造运动,形成于中-晚加里东期,并于早海西期定型。多期构造运动使研究区发育逆冲断裂及走滑断裂,自西向东依次发育中央隆起带、塔中10号构造带及塔中Ⅰ号坡折带,走滑断裂呈NE-SW向展布^[19-20],平面样式可分

为马尾、翼尾、线性、雁列、辫状等构造样式(图1)。

研究区古生界发育较为完整,在前寒武系基底之上发育了巨厚碳酸盐岩沉积。有关塔中Ⅱ区油气来源素有争议,存在中-上奥陶统烃源岩和下寒武统来源两种观点。随着LT1等井的寒武系烃源岩的揭示,多数学者倾向于整个台盆区油气主要来自下寒武统玉尔吐斯组烃源岩^[21-23],而近期对下寒武统分布的研究表明,早寒武世海侵时期塔中Ⅱ区位于古隆起高部位,下寒武统烃源岩欠发育,与之相邻的北部坳陷阿满过渡带为下寒武统烃源岩分布最厚的区域,因此普遍认为塔中Ⅱ区油气主要来自北部坳陷下寒武统烃源岩^[24-25]。目前塔中Ⅱ区油气主要产层为奥陶系良里塔格组及鹰山组,部分井区于志留系和石炭系砂岩地层获得油气产能。测井解释显示良里塔格组礁滩储层孔隙度介于1.2%~6.0%,渗透率分布于 $(0.1 \sim 5.0) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,储层致密,而靠近断裂区域发育大型裂缝^[26-27],孔隙度大于6.0%,且鹰山组发育大型不整合面,其储层主要为与走滑断裂相关的岩溶缝洞系统。该区的盖层主要发育有中寒武统厚层膏岩和上奥陶统桑塔木组泥岩,区域分布较为稳定^[27]。勘探开发显示:塔中Ⅱ区奥陶系油气分布较为复杂,存在凝析气、轻质油和中质油藏并存的现象,油气藏埋深大多介于5 000~7 500 m,井底温度最高可达162℃。

2 油气分布特征

2.1 原油性质

研究区116口油气井原油物性统计显示(表1):凝析油区20℃原油密度分布于0.731~0.812 g/cm³,均

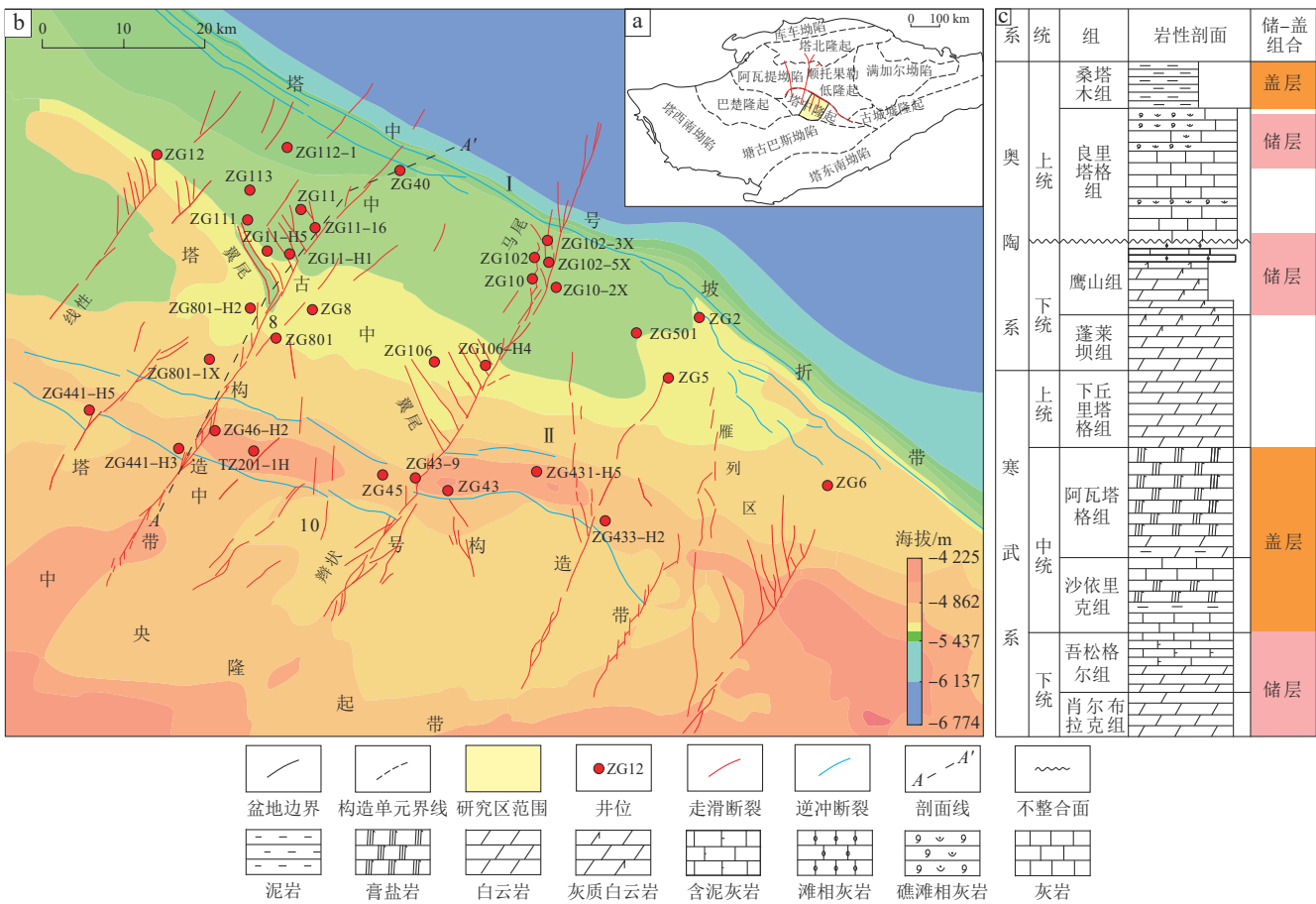


图1 塔里木盆地塔中Ⅱ区构造位置(a)和良里塔格组顶面构造(b)及下古生界综合柱状图(c)
Fig. 1 Maps showing the structural location (a), top structure of Lianglitage Formation (b) and the composite stratigraphic column (c) of the Lower Paleozoic in Tazhong II block, Tarim Basin

表1 塔里木盆地塔中Ⅱ区奥陶系原油物性

Table 1 Physical properties of the Ordovician crude oil in Tazhong II block, Tarim Basin

原油类型	项目	原油密度(20℃)/(g·cm ⁻³)	运动黏度(50℃)/(mPa·s)	胶质+沥青质含量/%	含硫量/%	含蜡量/%
凝析油	最大值	0.812	2.483	6.000	1.070	15.000
	最小值	0.731	0.398	0.020	0.010	0.200
	平均值	0.785	1.068	0.505	0.188	7.280
轻质油	最大值	0.873	10.960	6.630	0.173	19.000
	最小值	0.782	0.849	0.140	0.593	2.700
	平均值	0.831	3.422	1.766	0.413	8.705

值为0.785 g/cm³, 50℃原油运动黏度介于0.398~2.483 mPa·s, 胶质+沥青质含量分布于0.020%~6.000%, 含硫量介于0.010%~1.070%, 含蜡量介于0.200%~15.00%; 轻质油区20℃原油密度分布于0.782~0.873 g/cm³, 50℃原油运动黏度介于0.849~10.960 mPa·s, 胶质+沥青质含量分布于0.140%~6.630%, 含硫量分布于0.173%~0.593%, 含蜡量介于2.700%~19.000%。奥陶系原油整体表现为低密度、低黏度、较低的胶质+沥青质含量、低含硫及高含蜡特征。原油物性平面分布显示:原油密度和含蜡量

呈现西高东低的趋势,其中马尾构造(ZG102井区)、翼尾构造(ZG11井区和ZG106井区)走滑断裂带与撕裂逆冲断裂的交汇部位(ZG441井区和ZG43井区)原油密度、含蜡量、黏度、胶质+沥青质含量及含硫量相对较低,具有凝析油特征;而远离上述构造部位的原油物性参数相对较高,有轻质油特征(图2a)。

2.2 天然气组分特征

统计研究区116口井天然气组分及含量(表2),发现天然气的干燥系数和气/油比整体呈现东高西低的

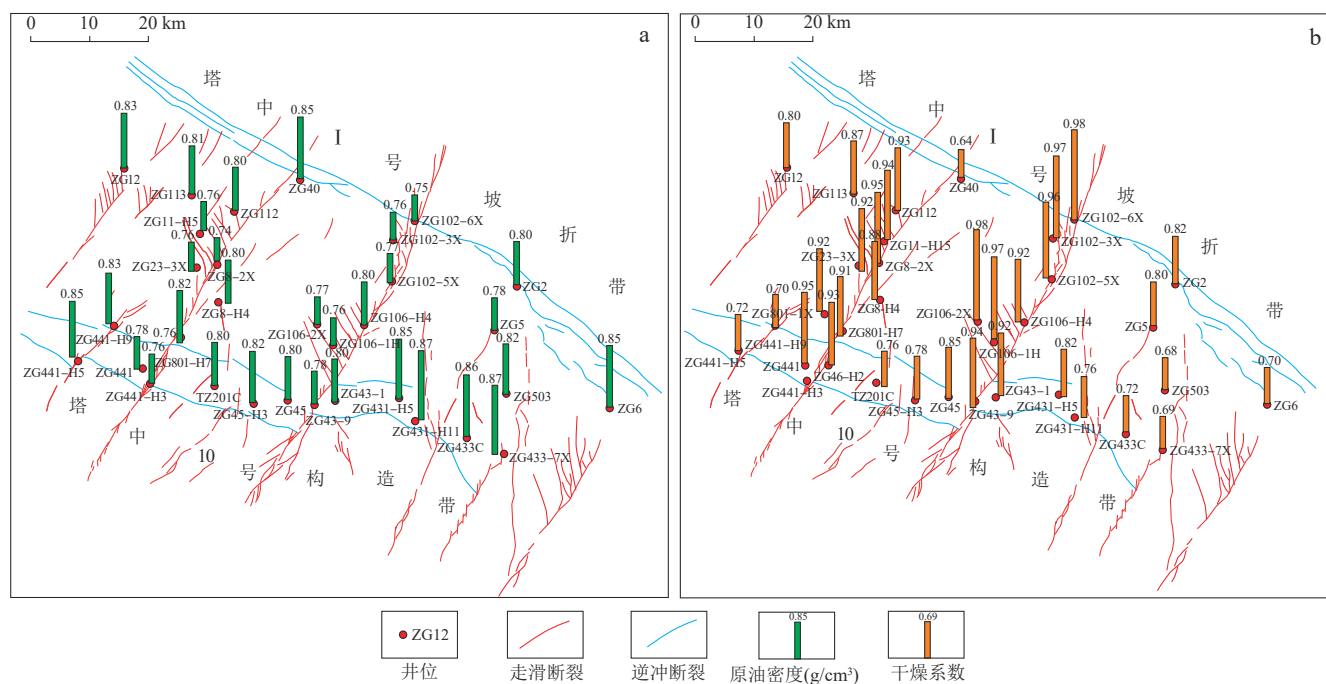


图2 塔里木盆地塔中Ⅱ区奥陶系原油密度(a)和天然气干燥系数(b)分布

Fig. 2 Distribution of the crude oil density (a) and gas drying coefficient (b) of the Ordovician reservoirs in Tazhong II block, Tarim Basin

表2 塔里木盆地塔中Ⅱ区奥陶系天然气物性

Table 2 Statistics of the physical properties of natural gas from the Ordovician in Tazhong II block, Tarim Basin

天然气类型	项目	组分含量/%						干燥系数
		甲烷	乙烷	丙烷及以上	氮气	二氧化碳	硫化氢	
凝析气区 天然气	最大值	92.50	9.68	11.80	19.71	15.10	6.95	0.98
	最小值	79.60	1.26	0.64	0.02	0.06	0.01	0.81
	平均值	85.20	3.69	4.43	4.16	3.09	1.03	0.92
轻质油区 天然气	最大值	68.84	16.44	23.08	26.00	24.70	10.44	0.93
	最小值	44.40	4.26	2.93	1.40	1.02	0.01	0.58
	平均值	85.21	7.33	8.84	6.96	4.09	3.42	0.81

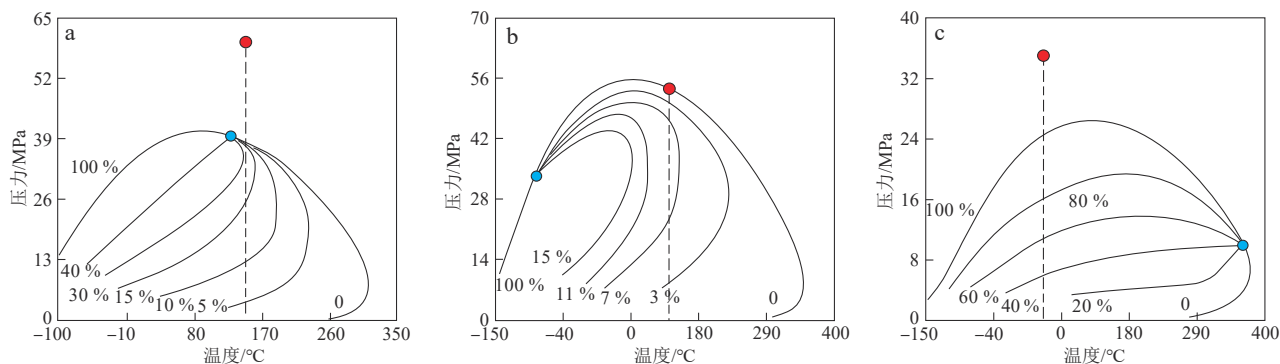
特征,其数值的高低与油气藏类型有关。其中,凝析气区天然气具有较高的甲烷含量,均值为85.20%,干燥系数分布于0.81~0.98,氮气含量介于0.02%~19.71%,二氧化碳含量介于0.06%~15.10%,硫化氢含量分布于0.05%~6.95%,气/油比大于1000;轻质油区天然气甲烷含量较低,均值为44.40%,干燥系数分布于0.58~0.93,氮气含量介于1.40%~26.00%,二氧化碳含量介于1.02%~24.70%,硫化氢含量分布于0.01%~10.44%,气/油比整体低于500。对比研究表明,凝析气藏天然气具有干气特征,轻质油藏区天然气干燥系数偏低,氮气、二氧化碳含量偏高。从平面分布来看:马尾构造(ZG102井区)、翼尾构造(ZG11井区和ZG106井区)走滑断裂带与逆冲断裂的交汇部位(ZG441井区和ZG43井区)天然气干燥系数与气/油比相对较高(图2b)。

2.3 油气藏相态

流体 pVT 相态模拟是油气藏相态判识的重要研究手段,研究选取3口典型油气开发井进行了 pVT 试验,结果表明塔中Ⅱ区未饱和凝析气藏、饱和凝析气藏、未饱和油藏等多相态油气藏并存(图3),结合原油物理性质(图2a)与干燥系数(图2b)等参数可以看出:不同相态油藏在平面上沿走滑断裂呈现杂乱分布特征,反映出复杂的成因关系。

3 多相态油气藏成因

前人研究表明,多相态油气藏成因与生烃母质、油气成熟度、保存条件、油气藏次生蚀变作用等有

图3 塔里木盆地塔中Ⅱ区奥陶系油气藏 pVT 实验相Fig. 3 pVT phase diagrams of the Ordovician reservoirs in Tazhong II block, Tarim Basin

a. ZG102井,未饱和凝析气藏;b. ZG43-9井,饱和凝析气藏;c. ZG431-H5井,未饱和油藏

(蓝点表示临界点,红点表示现今研究区油气藏的位置。)

关^[28-29]。本文依据地球化学资料对研究区油气成熟度及油气藏次生蚀变作用做出综合评价,揭示研究区多相态油气藏成因。

3.1 原油成熟度认识

3.1.1 饱和烃色谱分析

饱和烃色谱是原油成熟度评价及次生作用研究的重要依据^[30]。塔中Ⅱ区奥陶系原油色谱图呈前单峰型特征,凝析气藏区原油基线分布较为平整,而轻质油区ZG433-H2井区原油样品中检测到了“UCM”鼓包,推测与该井区处于隆起带易于遭受次生蚀变作用有关^[31]。原油中正构烷烃分布完整,无明显奇偶碳数优

势。凝析气藏区原油正构烷烃主峰碳数分布于 C_{15} — C_{17} ,轻质油区原油正构烷烃主峰碳数分布于 C_{17} — C_{20} ;凝析气藏区原油 nC_{21-}/nC_{22+} 含量比值介于1.46~5.60,均值为2.40;轻质油区原油 nC_{21-}/nC_{22+} 比值分布于0.81~1.47,均值为1.07(图4)。根据饱和烃色谱分析初步判定研究区奥陶系原油为烃源岩达到成熟演化阶段的产物,但不同构造带原油成熟度存在一定的差异。

3.1.2 芳香烃色谱-质谱分析

芳烃化合物的组成和分布特征可以反映原始有机质的母质类型、形成环境和成熟度特征等,其中芳烃甲基菲(MP)系列化合物及二苯并噻吩(MDBT)类化合物

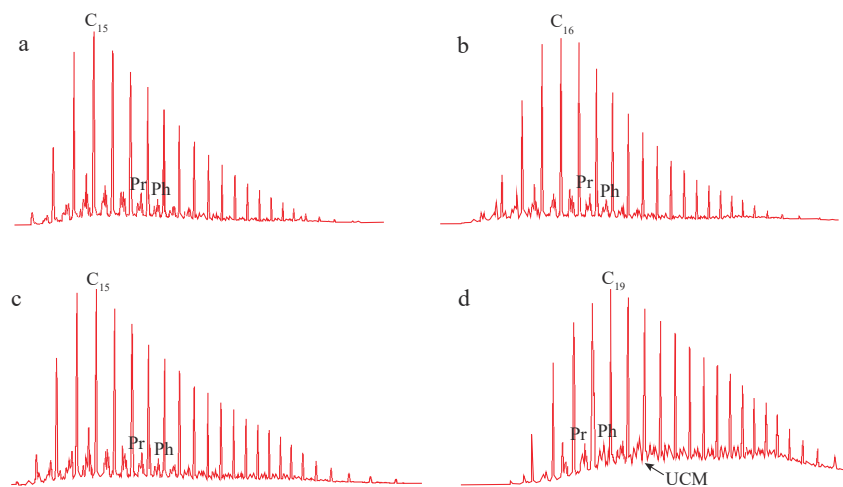


图4 塔里木盆地塔中Ⅱ区奥陶系原油饱和烃色谱-质谱

Fig. 4 Saturated hydrocarbon chromatography-mass spectrometry (GC-MS) of crude oil from the Ordovician in Tazhong II block, Tarim Basin

a. ZG11-16井,良里塔格组,埋深6 000~6 250 m,凝析油;b. ZG10-2X井,鹰山组,埋深5 995~6 471 m,凝析油;c. ZG801-1X井,良里塔格组,埋深5 607~5 898 m,凝析油;d. ZG433-H2井,鹰山组,埋深5 196~5 433 m,轻质油

参数具有较好的抗热解能力,在有机质正常热演化阶段可以作为良好的成熟度指标^[32-33]。根据甲基菲参数拟合原油成熟度(R_{c1})显示,塔中Ⅱ区奥陶系等效 R_{c1} 分布于0.60%~1.10%,为正常成熟度原油;轻质原油区 R_{c1} 介于0.60%~0.82%,凝析气藏区 R_{c1} 介于0.68%~1.11%(图5a)。甲基二苯并噻吩参数拟合原油成熟度(R_{c2})显示研究区 R_{c2} 分布于0.52%~1.20%,凝析气藏区 R_{c2} 介于0.55%~1.20%,轻质油藏区 R_{c2} 介于0.50%~0.80%(图5b),与甲基菲判别结果基本一致,部分样品成熟度高可能与晚期高熟油的充注有关。综合原油成熟度(普遍<1.20%)和下寒武统烃源岩埋深(7 000~10 000 m)认为,塔中Ⅱ区奥陶系原油整体为正常成熟度原油,非烃源岩高成熟阶段的产物,因此判断凝析气藏为次生成因。

3.2 天然气成因及成熟度

天然气碳同位素特征及组成受烃源岩热演化程度影响较大,通常能够反映其成熟的阶段^[34]。根据天然气碳同位素数据分析,研究区甲烷碳同位素值分布于-47.5‰~-35.7‰,乙烷碳同位素值介于-36.8‰~-29.4‰,具有典型油型气特征,其中ZG6井和ZG2井天然气碳同位素明显偏重,图1显示该井靠近塔中Ⅰ号坡折带,可能受到晚期高熟气的影响。ZG10井天然气碳同位素分布出现反转现象,根据戴金星所建立的油型气 $\delta^{13}C_1$ - R_o 的关系式 $\delta^{13}C_1 = 15.8 \lg R_o - 42.2$ ^[35],折算出天然气成熟度(镜质体反射率 R_o)为0.92%~2.60%,高于轻质原油区 R_{c1} (0.60%~0.82%),表明天然气具有更高的成熟度,由于该井处于走滑断裂和塔中Ⅰ号破折交汇带(图1),推测存在晚期高熟天然

气的充注(图6a)。

天然气的组成往往与成熟度关系密切,因此依据烃类比值图谱判别天然气成因是目前较为有效的方法^[36]。图谱判别显示,塔中Ⅱ区凝析气藏区天然气来源较为复杂,其中轻质油藏区天然气主要为干酪根降解气, R_o 小于1.2%(图6b);而凝析气藏区天然气存在干酪根降解气和原油裂解气混合, R_o 大于1.5%。综合分析认为,受多期断裂活动和油气充注的影响^[18,21],塔中Ⅱ区天然气为混合气,轻质原油区保存了早期的原油伴生气;而凝析气藏区天然气为晚期原油裂解气,凝析气藏的形成与晚期原油裂解气的充注密切相关。晚期气侵作用可能是造成塔中Ⅱ区凝析气藏形成的主要原因。

3.3 油气藏次生蚀变作用

深层油气藏受高温、高压及特殊岩性的影响,流体组分和性质通常会发生明显的蚀变,如生物降解、蒸发分馏、热裂解、硫酸盐热化学还原作用(TSR)等次生蚀变作用^[29]。塔中Ⅱ区奥陶系油气藏埋深大并经历了多期构造运动,可能存在一定的次生蚀变作用。

3.3.1 生物降解作用

前人研究结果表明,原油饱和烃色谱中“UCM”基线鼓包的出现,可能与生物降解作用等次生蚀变作用有关^[31]。研究区奥陶系原油饱和烃色谱分析显示,轻质油区原油中检测到“UCM”基线鼓包,但原油正构烷烃分布完整(图4),指示研究区存在多期油气充注,早期油藏因生物降解作用而部分破坏。

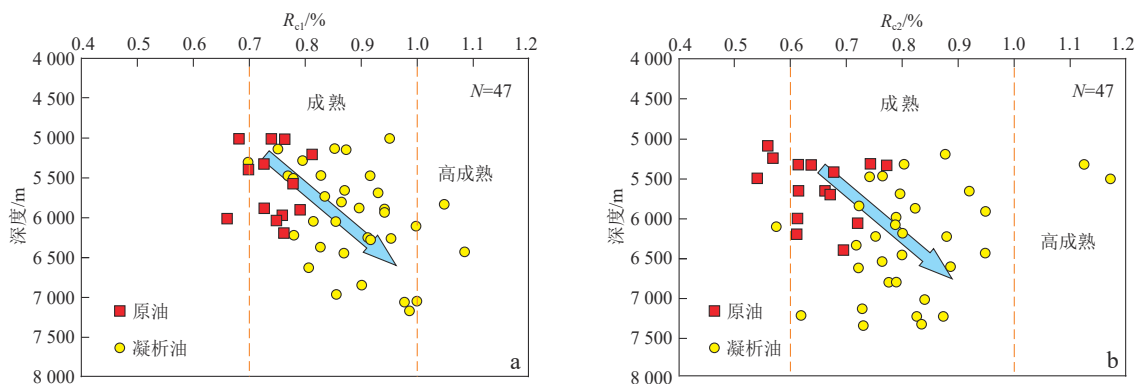


图5 塔里木盆地塔中Ⅱ区奥陶系原油等效镜质体反射率分布

Fig. 5 Vitrinite reflectance equivalent (R_c) distribution of crude oil from the Ordovician in Tazhong II block, Tarim Basin

a. R_{c1} -深度交汇图, $R_{c1}(\%) = 0.6MPI_1 + 0.4, MPI_1 = 1.5(3-MP + 2-MP)/(P + 9-MP + 1-MP)$; b. R_{c2} -深度交汇图, $R_{c2}(\%) = 0.35K_{2,4} + 0.46, K_{2,4} = 2, 4-MDBT/1, 4-MDBT$

MPI. 甲基菲指数; MP. 甲基菲; P. 菲; DMBT. 二甲基二苯并噻吩

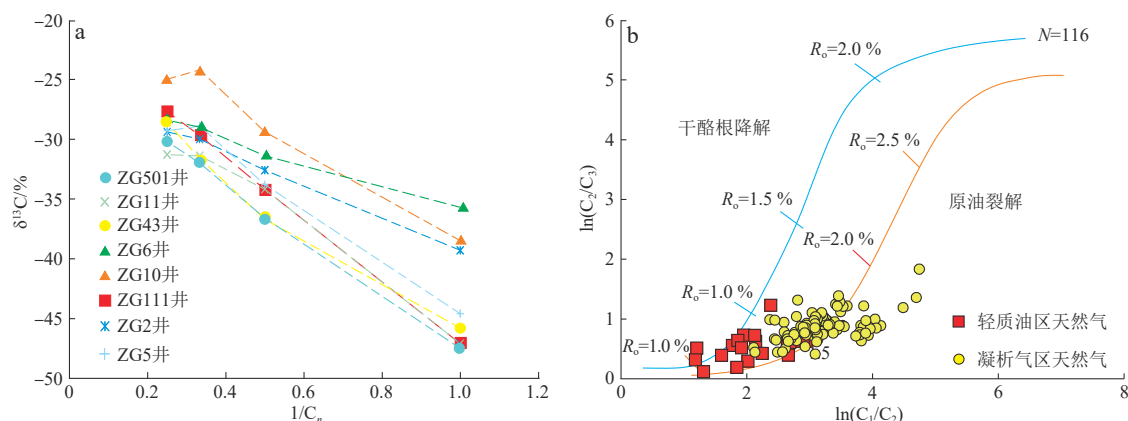


图6 塔里木盆地塔中Ⅱ区奥陶系天然气组分及碳同位素分布

Fig. 6 Composition and carbon isotope distribution of natural gas from the Ordovician in Tazhong II block, Tarim Basin

a. $\delta^{13}\text{C}-1/C_n$ 关系; b. $\ln(C_2/C_3)-\ln(C_1/C_2)$ 关系

3.3.2 蒸发分馏作用

蒸发分馏作用是气态物质从油藏中分离出来的复杂动态过程,晚期天然气对早期形成的油藏或油气藏进行充注改造是重要的成因之一,会引起油藏或油气藏中流体性质的改变^[37]。Moldowan等通过研究发现蒸发分馏作用会使原油中3-MD+4-甲基单金刚烷(3-MD+4-MD)与1-MA+2-甲基单金刚烷(1-MA+2-MA)发生配分,由于1-MA+2-MA挥发性较强,易溶于气相散失,因此残余油中具有更高的3-MD+4-MD含量^[38-40]。塔中Ⅱ区原油3-MD+4-MD与1-MA+2-MA分析数据表明,凝析气藏区原油3-MD+4-MD与1-MA+2-MA的含量整体高于其在轻质油中的含量,ZG102-5X井具有极高的3-MD+4-MD与1-MA+2-MA含量,其原因将在下文做详细阐述。缩小图谱值域可以看出3-MD+4-MD与1-MA+2-MA含量分布极为不均(图7a),指示研究区发生了强烈的蒸发分馏作用,结合天然气碳同位素分析,蒸发分馏作用可能是塔中

Ⅱ区凝析气藏形成的重要原因。

3.3.3 原油裂解

天然气成因分析指示塔中Ⅱ区原油存在大规模裂解,而金刚烷类化合物因具有极强的热稳定性与抗裂解能力而被广泛用于评价原油裂解程度^[41]。DAHL等学者的研究显示未裂解原油中存在一定量的3-MD+4-MD,而金刚烷化合物只能通过原油裂解产生。基于以上原理,DAHL提出利用3-MD+4-MD评价原油裂解程度的公式(1)^[42]

$$C_1 = (1 - C_0/C_c) \times 100\% \quad (1)$$

式中: C_1 为原油裂解程度,%; C_0 为未裂解原油中3-MD+4-MD含量, $\mu\text{g/g}$; C_c 为裂解原油中3-MD+4-MD含量, $\mu\text{g/g}$ 。

当 C_1 达到油-气转换界限62.5%时,原油大规模裂解。前人研究结果表明塔中地区未裂解原油中3-MD+4-MD含量为10.00 $\mu\text{g/g}$ ^[43]。本文基于以上研究以及塔中Ⅱ区10口井原油金刚烷质量色谱分析数据,

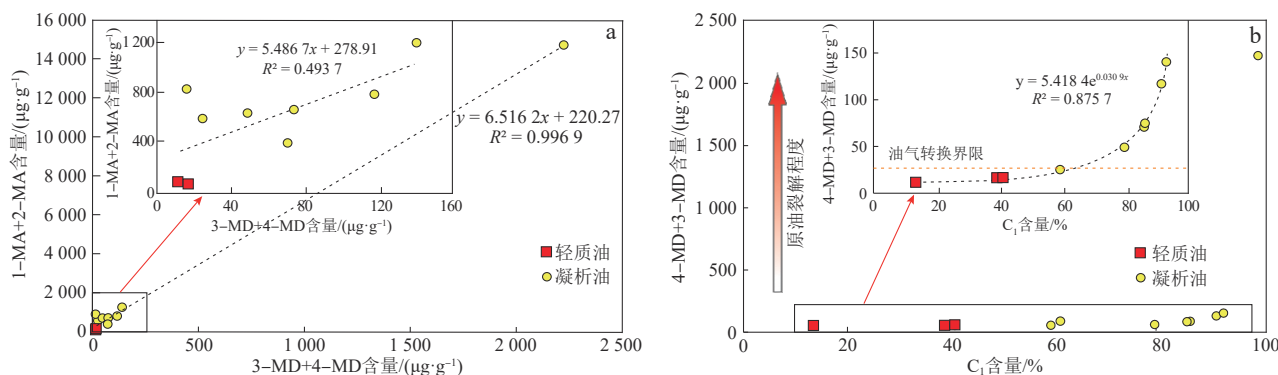


图7 塔里木盆地塔中Ⅱ区奥陶系原油金刚烷分析

Fig. 7 Adamantane analysis of crude oil from the Ordovician in Tazhong II block, Tarim Basin

开展塔中Ⅱ区原油裂解程度评价(图7)。分析结果显示,研究区3-MD+4-MD含量介于11.55~2 222.00 $\mu\text{g/g}$,其最高值出现在ZG102-5X井,该井气/油比高达19 356,位于塔中10号断裂带马尾地堑构造部位,翼尾地堑部位及走滑断裂带与逆冲断裂交汇部位ZG106-H4井和ZG43-9井3-MD+4-MD含量分别达到140.3 $\mu\text{g/g}$ 及117.5 $\mu\text{g/g}$,其余井数据分布于11.55~73.7 $\mu\text{g/g}$ 。从油气藏类型的3-MD+4-MD含量来看,轻质油区原油低于凝析气藏区原油的,其裂解程度低于油-气转换界限62.5%,凝析气藏区原油发生大规模裂解;然而塔中Ⅱ区奥陶系油气藏井底温度介于138~162 $^{\circ}\text{C}$,普遍未达到目前学术界所公认的原油裂解门限(160 $^{\circ}\text{C}$)。考虑到金刚烷具有分子量小、易散失等特点,结合天然气碳同位素及成熟度认为:深层高熟原油裂解气的充注是造成研究区3-MD+4-MD含量增高的主要原因,而ZG102-5X, ZG106-H4和ZG43-9井的高值表明马尾地堑、翼尾地堑及走滑断裂带与逆冲断裂交汇部位为晚期油气充注的有利通道。

3.3.4 硫酸盐还原作用

天然气组分分析表明,塔中Ⅱ区天然气中硫化氢含量介于180~99 700 $\mu\text{g/g}$,均值为18 090 $\mu\text{g/g}$,硫化氢含量极高,指示奥陶系原油可能发生了强烈的TSR,而研究区奥陶系储-盖组合中缺乏发生TSR所需的膏盐层,值得注意的是寒武系储-盖组合中阿瓦塔格组与沙依里克组发育区域膏盐盖层,寒武系盐下具有油气大规模富集的条件。结合天然气碳同位素与原油金刚烷化合物分析,晚期寒武系盐下古油藏与中寒武统膏盐层发生强烈的TSR,催化了盐下原油裂解,大规模原油裂解气沿走滑断裂运移至奥陶系储层气侵形成凝析气藏,因此研究区凝析气藏区原油具有较高的金刚烷含量,天然气具有较高的成熟度与硫化氢含量。

4 油气运移

大量研究表明,台盆区走滑断裂为研究区油气运移的主要通道,而走滑断裂构造差异控制了油气的充注方向^[44]。图5显示原油成熟度与油气藏埋深具有一定的相关性,指示研究区具有垂向油气充注特征,因此,查明不同走滑断裂带油气充注方向并判识充注点是解决油气运聚问题的关键。前人对塔中奥陶系流体性质的研究认为,芳烃成熟度参数如甲基二苯并噻吩参数为表征油气运移分馏效应及油气充注方向的可靠

指标^[32]。本文利用4-MDBT/1-MDBT参数并结合流体的性质判识奥陶系油气充注的方向。分析数据表明,ZG102井区(马尾构造)、ZG11和ZG106井区(翼尾构造)、ZG441和ZG43井区(走滑断裂带与撕裂逆冲断裂的交汇部位)4-MDBT/1-MDBT参数较高,沿断裂带向两侧降低,分布趋势与原油密度、原油含蜡量、天然气干燥系数、气/油比等参数相同,指示研究区存在上述5个有利油气充注点(图8)。值得注意的是,ZG10井区存在较高的4-MDBT/1-MDBT参数值,上述金刚烷化合物分析也表明ZG10井区具有较高的4-MD+3-MD含量,指示了该井区油气运移的主要通道。

5 油气藏形成演化过程

为进一步剖析塔中Ⅱ区油气差异分布规律,本文以中古8断裂带为例,利用高密度三维地震解释资料恢复了其不同时期奥陶系油气藏的形成特征。

晚加里东期为奥陶系油气藏初始形成期。北部坳陷下寒武统烃源岩进入成熟阶段并开始生烃^[45],由于中寒武统阿瓦塔格组、沙依里克组膏盐层的封堵,油气沿膏盐层底向塔中古隆起运聚,至塔中Ⅱ区后先于盐下圈闭聚集成藏后,沿走滑断裂带垂向充注,但小断裂附近油气充注强度有限,中-晚加里东期形成的翼尾地堑部位和走滑断裂带与撕裂逆冲断裂的交汇部位为油气充注的有利通道。加里东期走滑断裂活动叠加溶蚀作用形成的洞穴型、裂缝-孔洞型、孔洞型等深层岩溶缝洞体系为油气充注提供了良好的储集空间,油气富集于此。志留纪末期,塔中古隆起地层整体抬升遭遇剥蚀,奥陶系油气藏遭到大量破坏,导致志留系存在大规模沥青砂(图9a)。晚海西期是奥陶系油气藏形成的主要时期,下寒武统烃源岩进入生烃高峰期。需要注意的是晚加里东期之后,走滑断裂停止活动,处于封闭状态^[25],而下寒武统烃源岩具有多期生烃的特点,因此大量轻质油气富集于膏盐层之下的白云岩储层中。晚海西期走滑断裂强烈活动并开启,盐下油气沿翼尾地堑部位及走滑断裂与逆冲断裂交汇部位大规模充注,至奥陶系后沿不整合面侧向局部调整,对晚加里东期残存原油进行改造,油气富集于与走滑断裂相关的岩溶缝洞体系中(图9b)。喜马拉雅期是塔中Ⅱ区多相态油气藏形成的关键时期。此时塔中Ⅱ区快速沉降并埋深,寒武系盐下地层埋深超过8 000 m,同时北部坳陷下寒武统烃源岩进入高成熟度阶段即生湿气阶段。晚海西期之后走滑断裂停止活动,处于封闭状态,中寒武统膏盐层下封堵了晚海西期—喜马拉雅期下寒武统烃源岩生成

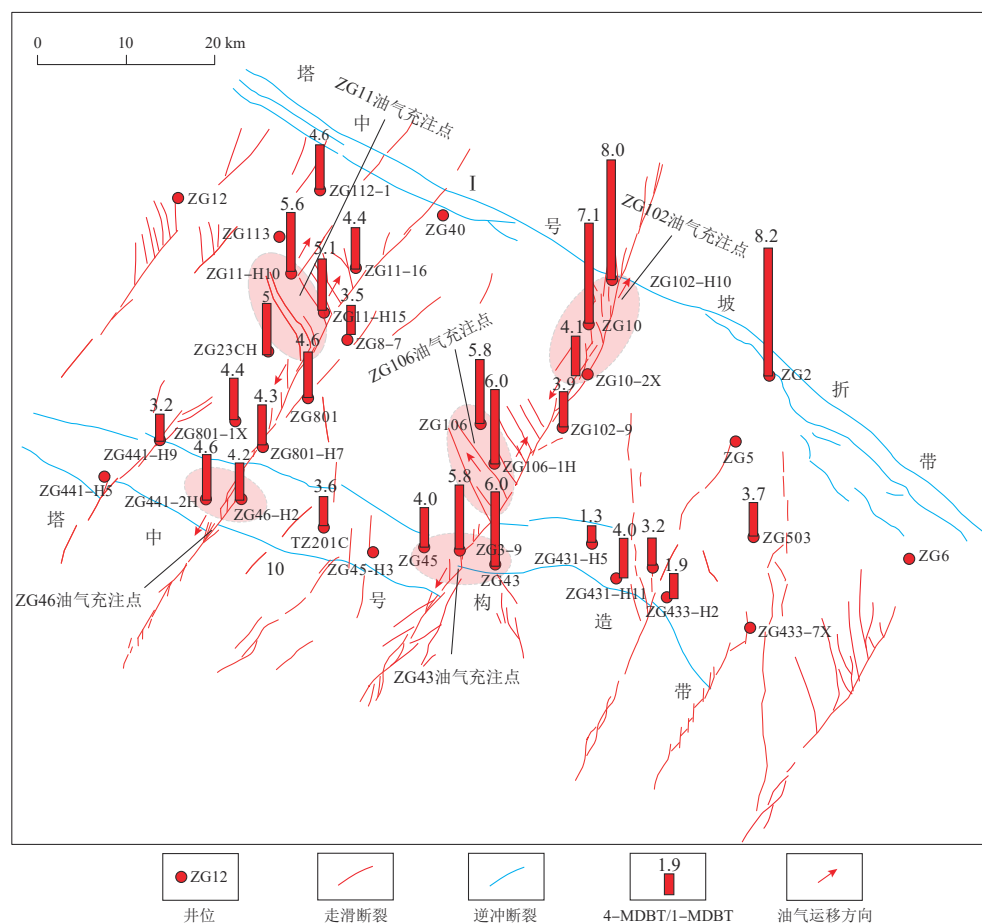


图8 塔里木盆地塔中Ⅱ区奥陶系原油4-MDBT/1-MDBT参数分布

Fig. 8 Distribution of 4-MDBT/1-MDBT ratios of crude oil from the Ordovician in Tazhong II block, Tarim Basin

的大量油气,北部坳陷及塔中Ⅱ区盐下古油藏与膏盐层发生强烈的 TSR,催化原油大规模裂解,盐下干气富集^[27]。在强烈的SW-NE向挤压应力作用下,喜马拉雅期走滑断裂活动并开启,原油裂解气沿翼尾地堑部位、走滑断裂与逆冲断裂交汇部位的深大断裂垂向气侵,对早期油藏进行改造,形成凝析气藏(图9c)。由于小断裂附近后期原油裂解气充注有限,几乎没有晚期高熟油气的混合,主要发育油藏且油气资源有限。生产资料表明ZG40井即是如此(原油密度为 0.85 g/cm^3 ,气/油比低于500)。

综合分析认为:走滑断裂的周期性开启与中寒武统膏岩层的封堵耦合作用控制了塔中Ⅱ区奥陶系油气成藏,油气呈3期幕式充注。奥陶系油气具有侧生邻储,垂向输导,断裂控富的特征,多期点状油气充注造成了奥陶系油气差异分布格局。

6 塔中Ⅱ区油气富集规律

通过大量的油气生产资料及油藏地球化学数据分析发现,多期构造运动形成的复杂走滑断裂系统为油

气运聚的有利通道,马尾、翼尾地堑部位及走滑断裂带与撕裂逆冲断裂交汇部位形成的深大断裂为油气有利充注点,走滑断裂与膏盐层耦合控制了奥陶系油气的富集。前人研究表明,碳酸盐岩油气成藏受其复杂“缝洞”体系的控制,油气先于走滑断裂近端的孔洞、裂缝充注成藏,然后向油气充注点较远的区域运移^[46],前述油气性质和组成的规律性变化也证明了这一观点,因此提出油气有利充注点附近即油气富集区域。根据塔中Ⅱ区奥陶系油气产量平面展布来看,油气于马尾构造、翼尾构造、走滑断裂带与逆冲断裂交汇部位所形成的深大断裂附近富集,如ZG102-3X, ZG11-H5, ZG43-9, ZG46-H2和TZ201-1H井产量均超过 $15 \times 10^4 \text{ t}$ 油当量。为高产油气井,远离有利充注点区域油气产量普遍不高,然而ZG106井区目前钻井较少,尚未取得较大突破,需要加大勘探力度(图10),有利充注点附近区域可作为奥陶系油气勘探重点。天然气及金刚烷化合物分析表明,喜马拉雅期塔中Ⅱ区奥陶系油气受到下寒武统原油裂解气的点状规模充注,盐下存在大规模气藏,值得进一步关注。

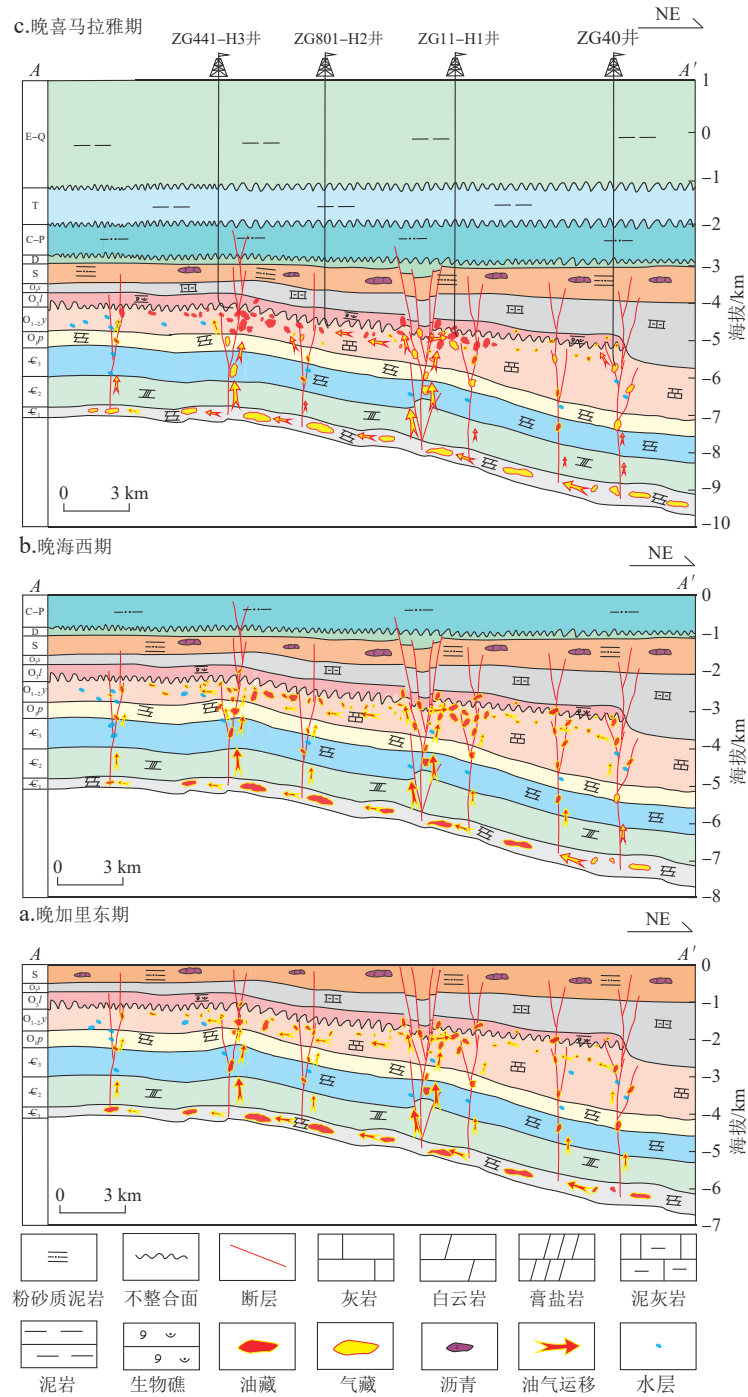


图9 塔里木盆地中古8断裂带奥陶系油气藏演化模式(剖面位置见图1b)

Fig. 9 Evolution model of the Ordovician hydrocarbon reservoirs in the Zhonggu-8 fault zone, Tarim Basin

(see Fig. 1b for the section location)

O_{3s}. 上奥陶统桑塔木组; O_{3l}. 上奥陶统良里塔格组; O_{1-2y}. 中-下奥陶统鹰山组; O_{1p}. 下奥陶统蓬莱坝组

7 结论

1) 塔中Ⅱ区奥陶系原油整体表现为低密度、低黏度、较低的胶质+沥青质含量、低含硫量及高含蜡量特征,平面上原油密度和含蜡量呈现西高东低的趋势,天

然气干燥系数和气/油比整体呈现东高西低的特征,天然气组分和含量与油气藏类型有关。

2) 塔中Ⅱ区奥陶系油藏 pVT 相态显示存在凝析气藏与轻质油藏沿走滑断裂共存的现象,轻质油区原油的饱和烃和芳烃生标显示其为成熟阶段的产物,凝析气区天然气碳同位素和烃类比值揭示其为原油伴生

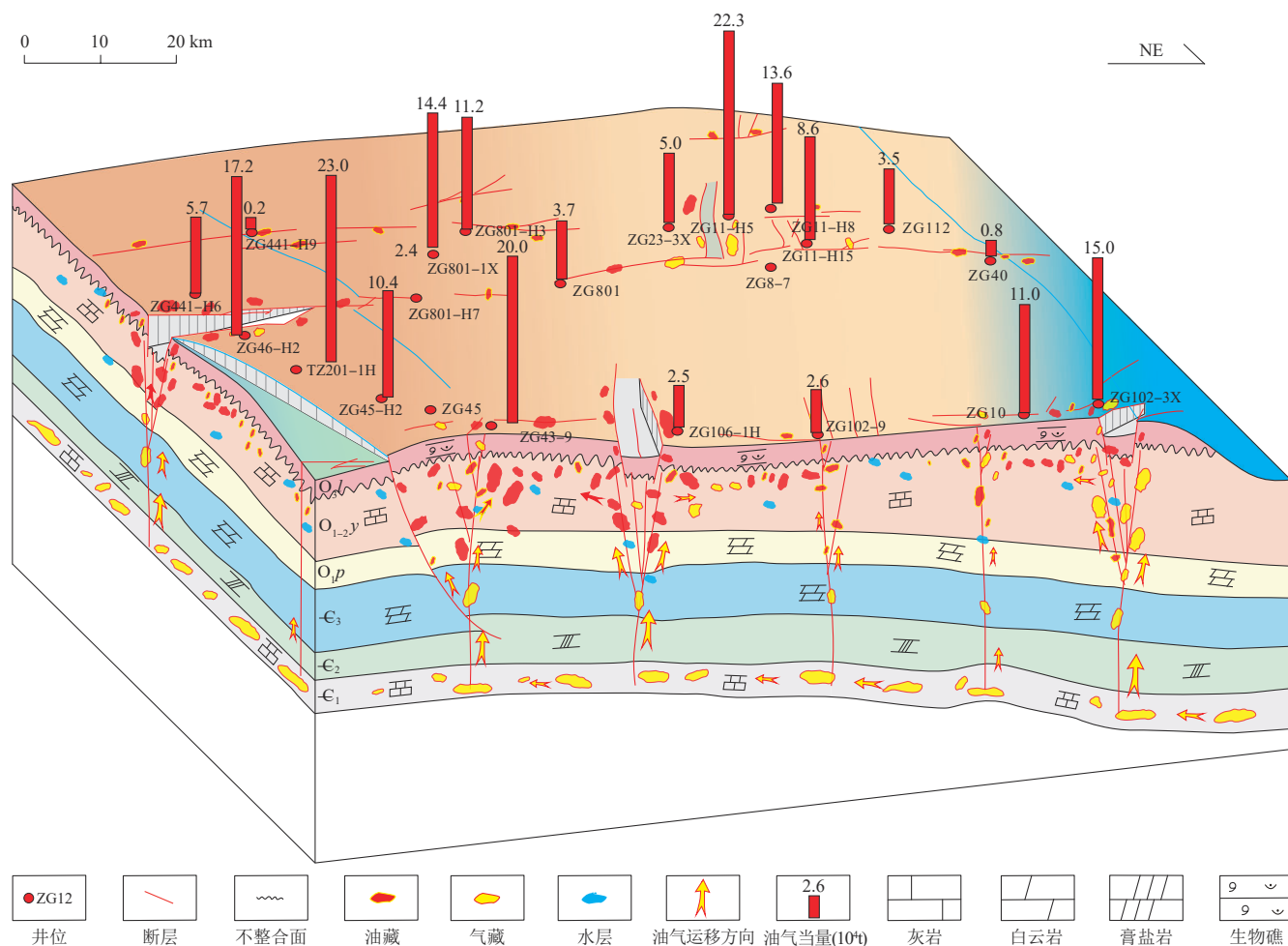


图10 塔里木盆地塔中Ⅱ区奥陶系油气富集模式

Fig. 10 Hydrocarbon accumulation model of the Ordovician in Tazhong II block, Tarim Basin

气和原油裂解气的混合。凝析气藏区原油具有较高的1-MA+2-MA和3-MD+4-MD含量,喜马拉雅期寒武系盐下原油裂解气的充注是研究区奥陶系凝析气藏形成的重要原因,轻质油藏区保存了早期生成的原油,并未受到大规模气侵。

3) 塔中Ⅱ区奥陶系油气成藏受到走滑断裂的周期性开启与中寒武统膏岩层封堵的耦合控制,油气优先聚集在下寒武统储层中,受走滑断裂晚加里东期、晚海西期和喜马拉雅期3期活动的影响,油气垂向充注进入上覆圈闭中,其中马尾构造(ZG102井区)、翼尾构造(ZG11井区和ZG106井区)及走滑断裂带与断裂逆冲断裂的交汇部位(ZG441井区和ZG43井区)具有较高的4-MDBT/1-MDBT参数值,与油气性质分布一致,为有利油气充注通道。

4) 奥陶系油气具有侧生邻储、垂向输导和断裂控富的特征,多期点状油气充注造成了奥陶系油气差异分布格局;马尾构造、翼尾构造、走滑断裂带与逆冲断

裂的交汇部位附近油气富集,可作为奥陶系油气勘探重点。寒武系盐下存在大规模气藏,值得进一步关注。

参 考 文 献

- [1] PUNANOVA S A, VINOGRADOVA T L. Specifics of the hydrocarbon and trace-element composition of oils and condensates from shallow-water marine deposits [J]. Petroleum Chemistry, 2010, 50(1): 23-30.
- [2] FAIRHURST B, EWING T, LINDSAY B. West Texas (Permian) Super Basin, United States: Tectonics, structural development, sedimentation, petroleum systems, and hydrocarbon reserves [J]. AAPG Bulletin, 2021, 105(6): 1099-1147.
- [3] CAI Jun, HE Youbin, LIANG Jianshe, et al. Differential deformation of gravity-driven deep-water fold-and-thrust belts along the passive continental margin of East Africa and their impact on petroleum migration and accumulation [J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 112: 104053.
- [4] 吕海涛, 耿锋, 尚凯. 塔里木盆地寒武系盐下领域勘探关键问题与攻关方向 [J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1049-1058.
LYU Haitao, GENG Feng, SHANG Kai. Key factors and directions of exploration in the Cambrian pre-salt sequence, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1049-1058.

- [5] 张文彪, 张亚雄, 段太忠, 等. 塔里木盆地塔河油田托甫台区奥陶系碳酸盐岩溶解体系统层次建模方法[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 207-218.
ZHANG Wenbiao, ZHANG Yaxiong, DUAN Taizhong, et al. Hierarchy modeling of the Ordovician fault-karst carbonate reservoir in Tuoputai area, Tahe Oilfield, Tarim Basin, NW China [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 207-218.
- [6] 黄诚, 云露, 曹自成, 等. 塔里木盆地顺北地区中-下奥陶统“断控”缝洞系统划分与形成机制[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 54-68.
HUANG Cheng, YUN Lu, CAO Zicheng, et al. Division and formation mechanism of fault-controlled fracture-vug system of the Middle-to-Lower Ordovician, Shunbei area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 54-68.
- [7] 田军, 王清华, 杨海军, 等. 塔里木盆地油气勘探历程与启示[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(3): 272-282.
TIAN Jun, WANG Qinghua, YANG Haijun, et al. Petroleum exploration history and enlightenment in Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(3): 272-282.
- [8] 常媛, 贾鹏飞. 塔里木盆地塔中地区连续型碳酸盐岩油气藏地质特征及形成原因[J]. 大庆石油地质与开发, 2022, 41(2): 11-15.
CHANG Yuan, JIA Pengfei. Geological characteristics and forming cause of the continuous carbonate reservoirs in Tazhong area, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2022, 41(2): 11-15.
- [9] 林潼, 王铜山, 李志生, 等. 塔里木盆地塔中地区中下寒武统油气充注演化过程与勘探方向[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(3): 42-54.
LIN Tong, WANG Tongshan, LI Zhisheng, et al. Hydrocarbon filling evolution and exploration direction of the Middle-Lower Cambrian interval in Tazhong area, Tarim Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(3): 42-54.
- [10] 李慧莉, 马安来, 蔡勋育, 等. 塔里木盆地顺北地区奥陶系超深层原油裂解动力学及地质意义[J]. 石油实验地质, 2021, 43(5): 818-825.
LI Huili, MA Anlai, CAI Xunyu, et al. Kinetics of oil-cracking of ultra-deep Ordovician oil in the North Shuntuoguole area of Tarim Basin and its geological implications [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(5): 818-825.
- [11] 林潼, 谭聪, 王铜山, 等. 川中地区龙王庙组油气差异聚集演化特征及其对气藏形成的影响[J]. 石油实验地质, 2022, 44(4): 655-665.
LIN Tong, TAN Cong, WANG Tongshan, et al. Differential hydrocarbon accumulation and its influence on the formation of gas reservoirs in the Longwangmiao Formation, central Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2022, 44(4): 655-665.
- [12] 刘树根, 孙玮, 赵异华, 等. 四川盆地震旦系灯影组天然气的差异聚集分布及其主控因素[J]. 天然气工业, 2015, 35(1): 10-23.
LIU Shugen, SUN Wei, ZHAO Yihua, et al. Differential accumulation and distribution of natural gas and their main controlling factors in the Upper Sinian Dengying Fm, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(1): 10-23.
- [13] 曹自成, 路清华, 顾忆, 等. 塔里木盆地顺北油气田1号和5号断裂带奥陶系油气藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 975-984.
CAO Zicheng, LU Qinghua, GU Yi, et al. Characteristics of Ordovician reservoirs in Shunbei 1 and 5 fault zones, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 975-984.
- [14] 国建英, 周立宏, 李剑, 等. 黄骅坳陷乌马营潜山天然气地球化学特征及差异聚集[J]. 石油学报, 2021, 42(8): 1039-1052.
GUO Jianying, ZHOU Lihong, LI Jian, et al. Geochemical characteristics and differential accumulation of natural gas in Wumaying buried-hill, Huanghua Depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(8): 1039-1052.
- [15] 杨学文, 田军, 王清华, 等. 塔里木盆地超深层油气地质认识与有利勘探领域[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(4): 17-28.
YANG Xuewen, TIAN Jun, WANG Qinghua, et al. Geological understanding and favorable exploration fields of ultra-deep formations in Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4): 17-28.
- [16] 康婷婷, 赵凤全, 刘鑫, 等. 塔里木盆地塔中北斜坡奥陶系鹰山组三段一四段油气富集主控因素及有利区带[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(4): 577-588.
KANG Tingting, ZHAO Fengquan, LIU Xin, et al. Main controlling factors of oil and gas enrichment and favorable zones: Case study of 3rd and 4th members of Ordovician Yingshan Formation, northern slope of Tazhong Uplift, Tarim Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(4): 577-588.
- [17] 杨海军, 邬光辉, 韩剑发, 等. 塔里木盆地中央隆起带奥陶系碳酸盐岩台缘带油气富集特征[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 26-30.
YANG Haijun, WU Guanghui, HAN Jianfa, et al. Characteristics of hydrocarbon enrichment along the Ordovician carbonate platform margin in the central uplift of Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 26-30.
- [18] 江同文, 韩剑发, 邬光辉, 等. 塔里木盆地塔中隆起断控复式油气聚集的差异性及主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(2): 213-224.
JIANG Tongwen, HAN Jianfa, WU Guanghui, et al. Differences and controlling factors of composite hydrocarbon accumulations in the Tazhong Uplift, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(2): 213-224.
- [19] 邬光辉, 庞雄奇, 李启明, 等. 克拉通碳酸盐岩构造与油气——以塔里木盆地为例[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
WU Guanghui, PANG Xiongqi, LI Qiming, et al. The structural characteristics of carbonate rocks and their effects on hydrocarbon exploration in craton basin: A case study of the Tarim Basin [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [20] 韩剑发, 邬光辉, 杨海军, 等. 塔里木盆地塔中隆起凝析气藏类型与成因[J]. 天然气工业, 2021, 41(7): 24-32.
HAN Jianfa, WU Guanghui, YANG Haijun, et al. Type and genesis of condensate gas reservoir in the Tazhong uplift of the Tarim Basin [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(7): 24-32.
- [21] ZHU Guangyou, CHEN Feiran, WANG Meng, et al. Discovery of the Lower Cambrian high-quality source rocks and deep oil and gas exploration potential in the Tarim Basin, China [J]. AAPG Bulletin, 2018, 102(10): 2123-2151.
- [22] ZHU Guangyou, LI Jingfei, ZHANG Zhiyao, et al. Stability and cracking threshold depth of crude oil in 8 000 m ultra-deep reservoir in the Tarim Basin [J]. Fuel, 2020, 282: 118777.
- [23] SHEN Weibing, CHEN Jianfa, WANG Yangyang, et al. The origin, migration and accumulation of the Ordovician gas in the Tazhong III region, Tarim Basin, NW China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 101: 55-77.

- [24] 韩剑发, 邬光辉, 肖中尧, 等. 塔里木盆地寒武系烃源岩分布的重新认识及其意义[J]. 地质科学, 2020, 55(1): 17–29.
HAN Jianfa, WU Guanghui, XIAO Zhongyao, et al. Recognition of the distribution of Cambrian source rocks and its significance for exploration in Tarim Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2020, 55(1): 17–29.
- [25] 杨福林, 云露, 王铁冠, 等. 塔里木盆地寒武系源岩地化特征及与典型海相原油对比[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(5): 851–861.
YANG Fulin, YUN Lu, WANG Tieguan, et al. Geochemical characteristics of the Cambrian source rocks in the Tarim Basin and oil-source correlation with typical marine crude oil[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(5): 851–861.
- [26] 魏国齐, 朱永进, 郑剑锋, 等. 塔里木盆地寒武系盐下构造-岩相古地理、规模源储分布与勘探区带评价[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(6): 1114–1126.
WEI Guoqi, ZHU Yongjin, ZHENG Jianfeng, et al. Tectonic-lithofacies paleogeography, large-scale source-reservoir distribution and exploration zones of Cambrian subsalt formation, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(6): 1114–1126.
- [27] 杨海军, 陈永权, 潘文庆, 等. 塔里木盆地南华纪—中寒武世构造沉积演化及其盐下勘探区意义[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(4): 84–98.
YANG Haijun, CHEN Yongquan, PAN Wenqing, et al. Study on tectonic and sedimentary evolution during the Nanhua-Middle Cambrian and its significance for subsalt exploration, Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4): 84–98.
- [28] ZHU G Y, LI J F, CHI L X, et al. The influence of gas invasion on the composition of crude oil and the controlling factors for the reservoir fluid phase[J]. Energy & Fuels, 2020, 34(3): 2710–2725.
- [29] AKHMADIYAROV A A, VARFOLOMEEV M A. Influence of the composition of oxygen-carbon dioxide gas mixture on the oxidation process of heavy crude oils [C]//19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019, Albena, 2019. Sofia: SGEM, 2019: 923–928.
- [30] ZHOU Chenxi, YU Shuang, HUANG Wenyu, et al. Oil maturities, mixing and charging episodes in the cratonic regions of the Tarim Basin, NW China: Insight from biomarker and diamondoid concentrations and oil bulk properties[J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 126: 104903.
- [31] WANG Qi, HAO Fang, CAO Zicheng, et al. Geochemistry and origin of the ultra-deep Ordovician oils in the Shunbei field, Tarim Basin, China: Implications on alteration and mixing[J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 123: 104725.
- [32] RADKE M. The methylphenanthrene index (MPI): A maturity parameter based on aromatic hydrocarbons[J]. Advances Organic Geochemistry, 1981, 1983: 504–512.
- [33] ZHU G Y, LI J F, WANG M, et al. Formation and distribution of ethanodiamondoids in deeply buried marine oil from the Tarim Basin, China[J]. Organic Geochemistry, 2021, 162: 104327.
- [34] ZHANG Zhiyao, ZHANG Yijie, ZHU Guangyou, et al. Impacts of thermochemical sulfate reduction, oil cracking, and gas mixing on the petroleum fluid phase in the Tazhong area, Tarim Basin, China[J]. Energy & Fuels, 2019, 33(2): 968–978.
- [35] ZHU Guangyou, ZHANG Zhiyao, ZHOU Xiaoxiao, et al. The complexity, secondary geochemical process, genetic mechanism and distribution prediction of deep marine oil and gas in the Tarim Basin, China[J]. Earth-Science Reviews, 2019, 198: 102930.
- [36] WU X Q, TAO X W, HU G Y. Geochemical characteristics and source of natural gases from Southwest Depression of the Tarim Basin, NW China[J]. Organic Geochemistry, 2014, 74: 106–115.
- [37] 牛成民, 王飞龙, 汤国民, 等. 复合油藏形成中的蒸发分馏与生物降解联合控制作用——以渤海海域秦皇岛29-2油田为例[J]. 石油实验地质, 2018, 40(3): 381–388.
NIU Chengmin, WANG Feilong, TANG Guomin, et al. Evaporative fractionation and biodegradation impacts on a complex petroleum system: QHD29-2 oil field, Bohai Sea area [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2018, 40(3): 381–388.
- [38] 晏继发, 马安来, 李贤庆, 等. 金刚烷化合物在深层油气地球化学研究中的应用[J]. 现代地质, 2020, 34(4): 812–820.
YAN Jifa, MA Anlai, LI Xianqing, et al. Application of diamondoids in geochemical research of deep oil and gas [J]. Geoscience, 2020, 34(4): 812–820.
- [39] 马安来. 金刚烷类化合物在有机地球化学中的应用进展[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(5): 851–860.
MA Anlai. New advancement in application of diamondoids on organic geochemistry[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(5): 851–860.
- [40] SMITH V S, TEJA A S. Solubilities of diamondoids in supercritical solvents[J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 1996, 41(4): 923–925.
- [41] 房忱琛, 翟佳, 胡国艺, 等. 凝析油中金刚烷类和硫代金刚烷类化合物同步检测方法及其地质意义——以塔里木盆地塔中地区凝析油为例[J]. 石油实验地质, 2021, 43(5): 906–914.
FANG Chenchen, ZHAI Jia, HU Guoyi, et al. A simultaneous determination method for diamondoids and thiadiamondoids in condensate oil and its geological significance: Taking condensate oil from central Tarim Basin as an example[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(5): 906–914.
- [42] PETERS K E, MOLDOWAN J M. The biomarker guide: Interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments [M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993: 230–232.
- [43] 池林贤, 张志遥, 朱光有, 等. 塔里木盆地塔中志留系油藏两期成藏的分子地球化学证据[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(4): 471–482.
CHI Linxian, ZHANG Zhiyao, ZHU Guangyou, et al. The molecular geochemical evidence of two accumulation stages of the Silurian reservoirs in Tazhong Uplift, Tarim Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(4): 471–482.
- [44] 邬光辉, 马兵山, 韩剑发, 等. 塔里木克拉通盆地中部走滑断裂形成与发育机制[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 510–520.
WU Guanghui, MA Bingshan, HAN Jianfa, et al. Origin and growth mechanisms of strike-slip faults in the central Tarim cratonic basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 510–520.
- [45] 刘雨晨. 塔里木盆地顺托果勒低隆起及周缘热演化研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
LIU Yuchen. Thermal evolution of the Shuntuoguole low uplift and the surrounding areas in Tarim Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2019.
- [46] 王阳洋, 陈践发, 庞雄奇, 等. 塔中地区奥陶系油气充注特征及运移方向[J]. 石油学报, 2018, 39(1): 54–68.
WANG Yangyang, CHEN Jianfa, PANG Xiongqi, et al. Ordovician hydrocarbon charging characteristics and migration direction in Tazhong area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(1): 54–68.