

文章编号: 0253-9985(2005)06-0717-07

地球化学动态示踪油气成藏过程初探 ——以库车坳陷大宛齐构造为例

刘文汇^{1,2}, 张殿伟², 郑建京¹, 陈孟晋³, 王晓锋¹, 高波²

(1 中国科学院气体地球化学重点实验室, 甘肃兰州 730000)

2 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083

3 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 塔里木盆地库车坳陷大宛齐油气藏中³⁸Ar的富集与缺氧流体及挥发分沿大断裂运移有关, 吐孜玛扎断裂是流体活动形成的³⁸Ar运移至油气藏的主要通道; 而大北油气藏低的³⁸Ar丰度显示了气源就近成藏的特征。大宛齐油气田为原生油气藏, 并非后期气侵作用形成。油气藏形成后期, 因圈闭封闭能力弱造成气体轻组分沿破裂部分散逸, 形成现今饱和程度较低的凝析气藏。大宛齐油气田为下生上储型成藏, 三叠系和侏罗系为其主生油层系。在大宛齐油气田的形成过程中, 烃类先沿吐孜玛扎断层运移, 再从北向南进入大宛齐构造。大宛齐油气藏中的液态烃为中生界淡水湖相沉积有机质在成熟-高成熟演化阶段的产物。大宛齐油气田经历了早期与晚期两个充注过程, 晚期充注的高-过成熟天然气密度较小因而主要聚集在上方, 早期形成的相对高密度的天然气主要聚集在下方。

关键词: 同位素组成; 成藏过程; 地球化学示踪; 库车坳陷; 塔里木盆地

中图分类号: TE112.3 文献标识码: A

A preliminary discussion on geochemical dynamic tracing of oil/gas reservoiring process

— taking Dawanqi structure in Kuqa depression as an example

Liu Wenhui¹, Zhang Dianwei², Zheng Jianjing¹, Chen Mengjin³, Wang Xiaofeng¹, Gao Bo²

(1 Key Laboratory of Gas Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu;

2 Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing;

3 Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing)

Abstract In Dawanqi oil/gas pool in Kuqa depression, Tarim basin, the enrichment of³⁸Ar was related to the migration of anoxic fluids and volatile constituents along large faults. Tuzimazha fault is the major pathway through which³⁸Ar generated from fluid activities would have migrated to the oil and gas reservoirs. The low concentration of³⁸Ar in Dabai reservoir reveals that gas would have been reservoired near the source rocks. Dawanqi oil/gas field is not an oil/gas pool as a result of later gas invasion, but is a primary oil/gas pool. The light components of gas partially dispersed along the fault due to the poor sealing ability of the trap at later reservoiring stage, leading to the formation of the current condensate gas reservoir with relatively low saturation. Hydrocarbons were generated from the Triassic and Jurassic major source rocks below, and were accumulated in the reservoir rocks above, i.e., hydrocarbons have been generated from the organic matters in the Mesozoic fresh lake facies sediments during mature to high-mature evolutionary phases. During the reservoiring process of

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973)项目 (2001CB209102)

第一作者简介: 刘文汇, 男, 48岁, 研究员 (博士生导师), 天然气地质学及油气地球化学

收稿日期: 2005-09-29

Dawanqi oil/gas pool hydrocarbons first migrated upward along Tuzmazha fault and then entered Dawanqi structure from north to south. Dawanqi oil/gas pool has experienced early and late charging processes. The high mature to overmature natural gas charged in later stage would have mainly accumulated in the upper part due to their relatively low density, while the relatively high density natural gas generated in early stage would have accumulated in the lower part.

Key words isotopic composition; reservoiring process; geochemical tracing; Kuqa depression; Tarim basin

有机地球化学、同位素地球化学已成为油气来源、有机质成烃演化、运移聚集成藏判识的最重要的研究方法^[1~9]。各类指标的基本原理在于有机质成烃演化过程中的母体继承效应和动态过程的化学组成与同位素组成的分馏^[10~13]。随着沉积盆地油气勘探程度的提高、现代地球化学实验技术方法的改进和仪器分析精度的提高,使油气地球化学研究特别是油气源的精细对比成为可能^[14~16]。本文以塔里木盆地库车坳陷大宛齐油气田为例,在已有油气地球化学资料的基础上,依据新获得的天然气地球化学资料,结合沉积坳陷构造演化过程,作反演成藏动态过程的尝试,以便为油气地质和地球化学领域开拓新的研究理念。

1 区域背景及现有成果

大宛齐油气田位于库车坳陷拜城凹陷腹地的西端,北与吐孜玛扎背斜毗邻,以平缓向斜和逆冲大断裂过渡。大宛齐背斜在东、南、西三翼均向拜城凹陷倾没,为凹中之隆。大宛齐背斜核部发育有 3 组喜马拉雅期形成的正断层。3 组断层相互切割,从而形成了大宛齐背斜核部不同的断块。大宛齐油气田为下生上储型成藏。现有

研究成果表明,三叠系和侏罗系为其主生油层系^[17]。由于拜城凹陷三叠系和侏罗系烃源岩与上第三系康村组储集层中间有巨厚的膏岩层遮挡,三叠—侏罗系烃源岩形成的油气只能通过北部的吐孜玛扎大断裂向上运移进入康村组,形成大宛齐油气田;在膏岩层之下则形成高—过成熟的大北气藏(图 1)。

大宛齐油气田在浅层分布有正常原油、轻质油和天然气。天然气地球化学特征与库车坳陷其他区域有一定差别,天然气的碳同位素组成较重(表 1)。在库车坳陷的天然气中,大宛齐油气田天然气甲烷碳同位素组成仅轻于克拉苏构造带的高演化天然气,而且垂向上具有自下而上逐步变重的特征^[18]。大宛齐背斜形成于上新统库车组沉积晚期—第四纪(3.5~0 Ma),几乎与克拉 2 等超大型气藏的形成时间同步。前人研究结果认为^[18],现有大宛齐油气藏与库车坳陷三叠—侏罗系烃源岩早油晚气的生烃史不符,可能是经下部地层后期高—过成熟气气洗、从而在上部地层中重新成藏的结果,属于次生油气藏。

根据现有资料^[19],大北气藏无疑为高—过成熟气。但大宛齐油气藏的形成,需要进一步探讨。

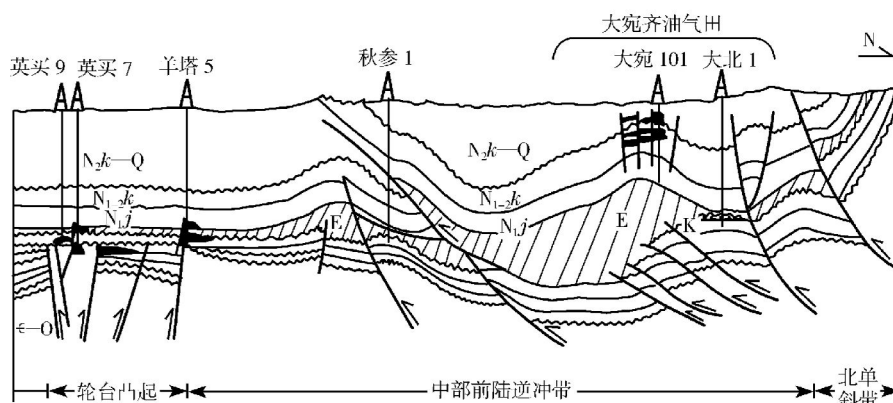


图 1 大宛齐油气藏剖面示意图^[16]

Fig. 1 Diagrammatic cross section of Dawanqi oil/gas pool

表 1 大宛齐油气藏天然气的碳同位素组成^[18]

Table 1 Carbon isotopic composition of natural gas in Dawanqi oil/gas pool

井号	层位	井深 /m	$\delta^{13}\text{C}_1$ /‰	$\delta^{13}\text{C}_2$ /‰	$\delta^{13}\text{C}_3$ /‰	$\delta^{13}\text{C}_4$ /‰
大北 1	E	5 568~ 5 620	- 29. 73	- 21. 7	- 20. 8	- 21. 9
大宛 1	$\text{N}_{1-2}k$	1 212~ 1 214	- 33. 3	- 21. 6	- 26. 5	- 23. 7
大宛 1	$\text{N}_{1-2}k$	2 140~ 2 146	- 33. 4	- 22. 9	- 27. 5	- 24. 6
大宛 1	N_1k	472~ 475	- 30. 9	- 20. 5	- 23. 1	- 24. 9
大宛 1	N_1k	537~ 539	- 32. 0	- 19. 5	- 22. 6	- 21. 9
大宛 101	$\text{N}_{1-2}k$	1 590~ 1 592	- 31. 8	- 22. 5	- 21. 0	- 22. 8
大宛 101	$\text{N}_{1-2}k$	2 585~ 2 590	- 32. 7	- 22. 8	- 20. 5	- 22. 2
大宛 105- 25	$\text{N}_{1-2}k$	367~ 396	- 28. 5	- 19. 6	- 13. 2	- 22. 2
大宛 2	K	5 658~ 5 670	- 30. 8	- 21. 5	- 19. 8	未测

已往研究中获得的有关大宛齐油气藏的地球化学特征,对进一步分析大宛齐油气藏的形成过程具有重要意义。

1)大宛齐原油比重由深到浅明显变轻(图 2)。从图中还发现,原油比重在最浅处又有变重的趋势。

2)天然气组分表现为由深到浅变湿,干燥系数降低。特别在浅部(小于 800 m),整体明显变湿。(图 3)

3)平面上大宛齐背斜南、北翼油气物性有变化。北翼气干,油比重轻;向南干燥系数明显增大。这说明油气来自北侧的吐孜玛扎断层,在第三系中由北向南运移。

4)浅部油藏饱和程度低,由下向上具有下部

油藏饱和程度高于上部的特点。

2 油气地球化学特征

为了多参数示踪大宛齐成藏过程,我们对大宛齐油气田天然气中的稀有气体同位素和伴生轻质油的有机地球化学进行了分析,以便客观、有效地进行动态示踪。

2.1 稀有气体同位素

稀有气体因其化学性质上的惰性,在地质作用过程中其丰度和同位素组成变化几乎不受复杂化学反应的影响,而主要取决于核反应、溶解、吸附和吸着等物理过程。各种天然物质中原始稀有气体的丰度比宇宙中的丰度低得多,因此地质体中核过程和物理过程产生的稀有气体组分

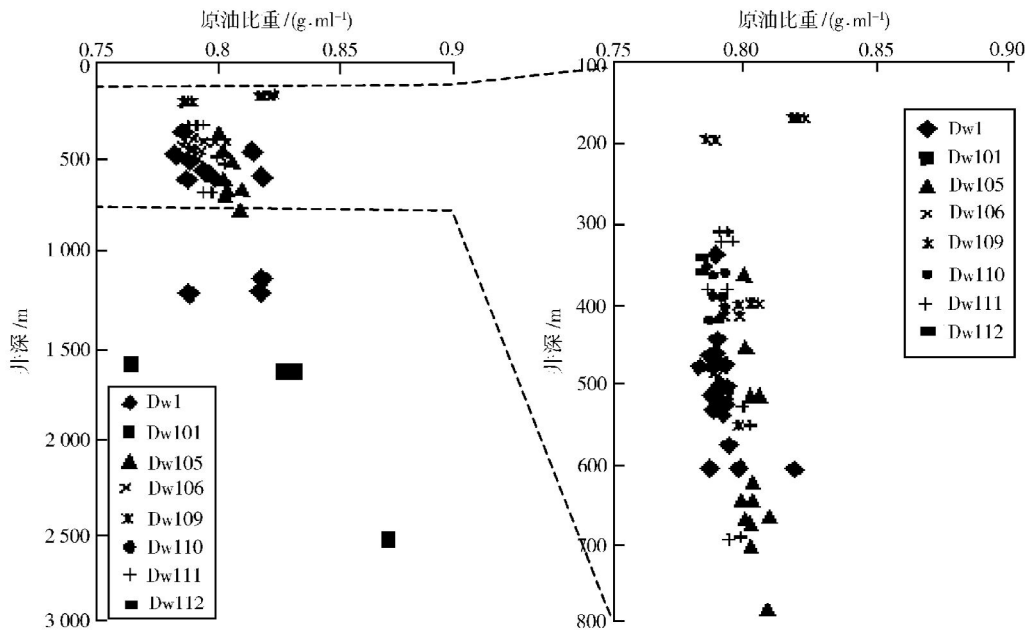


图 2 大宛齐油藏原油比重垂向变化^[18]

Fig. 2 Diagram showing vertical variation of relative density of crude oil in Dawanqi oil reservoir

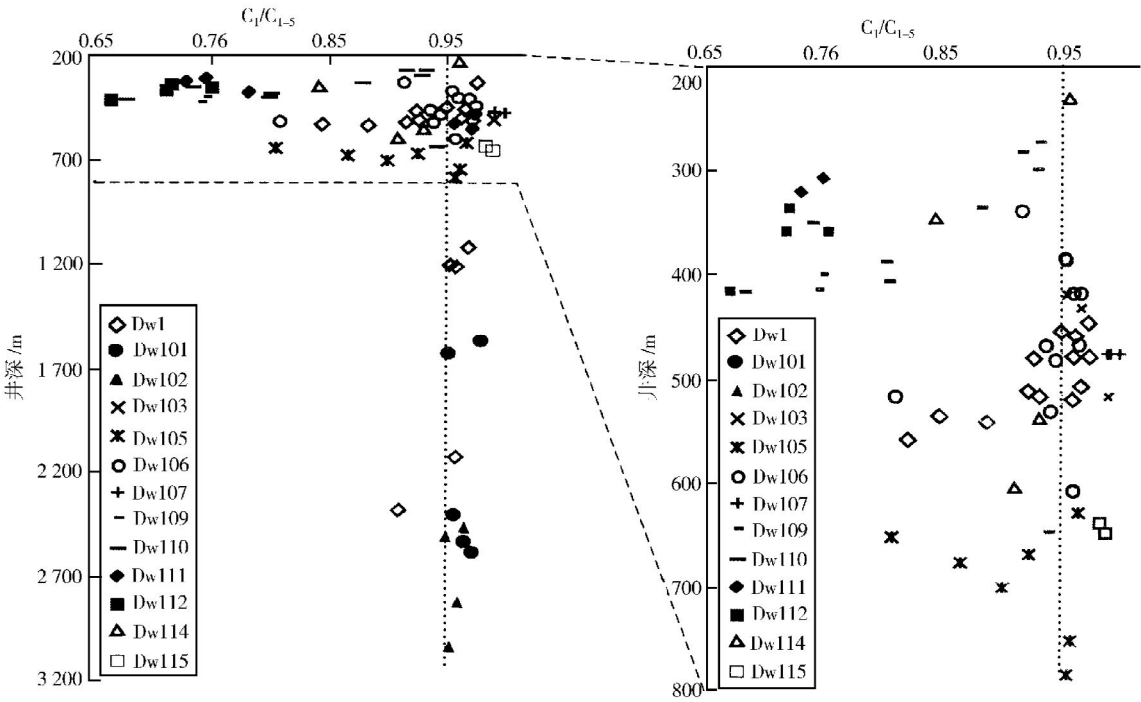


图 3 大宛齐天然气干燥系数垂向变化^[18]

Fig. 3 Diagram showing vertical variation of drying coefficient of natural gas in Dawanqi gas reservoir

及其同位素组成变化十分明显,使稀有气体同位素组成成为地学研究中的一种非常有效的示踪手段^[5]。

天然气中 He 和 Ar 的同位素组成性质主要受两种因素制约:一是岩石矿物中⁴He 和⁴⁰Ar 母体放射性元素 U、Th 和 K 的含量及自然衰变历程,存在源岩年代积累效应;二是大地构造背景条件,即不同盆地含油气区块深大断裂的发育及其与地幔的连通性,反映在同位素组成上就是幔源挥发分的复合程度^[20]。在油气地质研究中,氦同位素在更大程度上反映了盆地发展演化进程中的稳定与活动背景;而氩同位素在稳定和构造活动相对较弱

的区域源岩年代积累效应方面更为明显。

对大宛齐油气田天然气中的稀有气体同位素进行分析,结果列入表 2。同时,为进行综合对比研究,将塔里木盆地有关的天然气地球化学分析资料也一并列入表中。

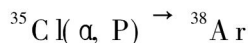
大宛齐气藏在稀有气体同位素组成上,其⁴⁰Ar/³⁶Ar 比值 1 120 是该坳陷最高者,几乎接近塔西南阿克 1 井的 1 438。同时,两者最大的相似之处是均具有较重的甲烷氢同位素组成以及较高的³⁸Ar/³⁶Ar 比值(表 2)。关于稀有气体³⁸Ar 的形成条件及指示意义,我们将在另文中讨论,这里只作简要介绍。

表 2 库车坳陷及阿克 1 井天然气地球化学数据对比

Table 2 Correlation of geochemical data of natural gas in Kuqa depression and in Ake 1 well

区域	井号	层位	井段 /m	$\delta^{13}C_1 / \%$	$^3He/^4He$	$^{40}Ar/^{36}Ar$	$^{38}Ar/^{36}Ar$	$\delta D_{CH_4} / \%$
大宛齐	大宛 105-25	$N_{1-2}k$	367~396	-28.5	5.67×10^{-8}	1 120	0.236 3	-156
	大北 2	K	5 658~5 670	-30.8	5.32×10^{-8}	1 065	0.206 0	未测
塔西南	阿克 1	K_2-K_1	3 226~3 341	-23.0	8.34×10^{-7}	1 438	0.223 8	-131
克拉 2	克拉 2	K	3 888~3 896	-27.8	未测	未测	未测	未测
	克拉 2-7	E	3 743	-27.3	3.40×10^{-8}	1 369	0.195 1	-163
迪那	迪那 2	N_{1j}	4 597~4 876	-34.3	2.48×10^{-8}	536	0.200 6	未测
牙哈	牙哈 23-1-5	N_{1j}	4 946~4 988	-30.7	3.46×10^{-8}	613	0.194 8	-185
	牙哈 1	E	5 451~5 466	-33.4	3.81×10^{-8}	727	0.199 4	未测
却勒	却勒 1	K	5 761~5 764	-34.9	5.36×10^{-8}	624	0.206	未测

$^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值高具有特定的地质意义,代表了深部断裂作为流体运移通道的特征。稀有气体中 ^{36}Ar 主要是空气成因,而 ^{38}Ar 的来源为单一的核反应成因,其形成过程可以表示为



其中 ^{38}Ar 的母体 ^{35}Cl 在自然界丰度较高。元素Cl有两个同位素 ^{35}Cl 和 ^{37}Cl 其中 ^{35}Cl 在Cl中的丰度为75.53%。地壳沉积层及地壳的Cl元素分布是广泛的。 ^{35}Cl 核衰变反应形成 ^{38}Ar 的另一个必要条件是具有 α 粒子。而在沉积壳层, α 粒子则来自于U、Th等放射性元素。纵观在地质过程中可以形成 ^{38}Ar 气体同位素物质的空间分布可以发现,在富含Cl元素的物质中,大部分不含或少含放射性元素,如石盐、钾盐等,而富含放射性元素的地质体中,Cl的丰度又相对低,如沉积有机质等。而两者同时相对富集,并直接形成化合物且具有相互作用的地质空间,是深部缺氧有热液作用的还原环境^[21]。这时,U、Th与Cl形成 UCl_4 ,在其结合的条件下,可以按核反应方式形成 ^{38}Ar 。在该核反应过程中,产物为气态的 ^{38}Ar ,因此产物的活动受气体运移规律控制。如果有其他动力条件,比如较大的断裂,气态 ^{38}Ar 会与挥发性物质共同迁移。尽管在其他条件下也有可能产生气态 ^{38}Ar ,但与 ^{40}Ar 、 ^{36}Ar 相同,如果没有二次运移的动力条件,则无法进入到目前我们获得气体的产层之中。因此,自然核反应形成的 ^{38}Ar 在天然气中富集应该主要与深部缺氧流体存在且有挥发分运移的地质条件——大断裂有关。简言之, ^{38}Ar 的丰富程度应该与断裂的规模及其切割深度有关。

根据以上分析,大宛齐和大北油气藏中 ^{38}Ar 的富集与缺氧流体及挥发分沿大断裂运移有关。结合其地质背景,吐孜玛扎断裂无疑成为流体活动形成的 ^{38}Ar 运移至油气藏的主要通道。

2.2 原油

大宛齐油气田的烃源岩是中生界还是古生界、陆相还是海相、直接成藏还是气洗再调整成藏,关键问题是目前油藏中原油的演化程度。如果是早期形成的正常原油经气浸后重新调整成藏,则目前的原油仍显示其成熟油的地球化学特征。如果是高演化的凝析油气,则应该是与气近同期的产物,属于同期成藏。为此,我们对大宛109-7井轻质油样进行了分析。

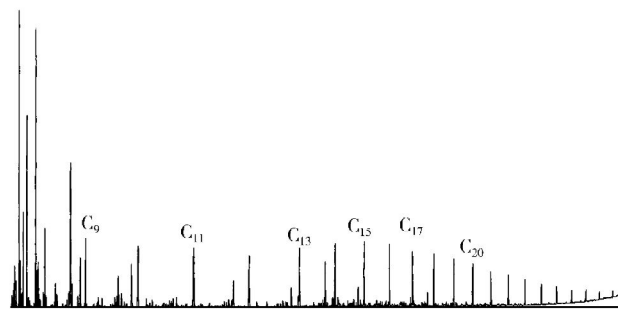


图 4 大宛 109-7 井轻质油全烃色谱

Fig. 4 All hydrocarbon chromatogram of light oil in DW 109-7 well

通过对大宛齐油气藏轻质油的饱和烃色谱分析,发现该轻质油碳数分布在 C_7 — C_{33} ,主峰碳为 C_8 , C_{20} 以后正构烷烃的相对丰度很低(图4)。类异戊二烯含量很低, $\text{Pr}/\text{Ph} = 2.25$ 反映了一种淡水—微咸水深湖相原油的特征^[22]。

梁狄刚等^[19]对库车坳陷油气地球化学进行了系统研究,认为坳陷西端构造带的原油和凝析油主要来自中侏罗统(J_2q)湖相泥岩。我们对大宛齐油气藏大宛109-7井原油进行了色-质谱分析,其地球化学指标特征为:甲基菲指数 $\text{MPI}_1 = 0.336$, $\text{MPI}_2 = 0.362$ 。研究表明,在烃源岩的热演化过程中,当 R_o 小于1.2%时, MPI 与成熟度 R_o 成正比;当 R_o 大于1.2%时,随着热演化程度的增加, MPI 逐渐减小(成反比)^[23]。利用Radke等提出的 R_o 与 MPI 关系式计算,其相应 R_o 为2.1%,该样品应为高成熟原油。此外,大宛齐轻质油密度平均为 0.789 g/cm^3 ,为库车坳陷最轻的原油;且全油碳同位素组成很重($\delta^{13}\text{C}_{\text{油}} = -27.4\text{‰}$),亦反映出较高的成熟度。综上所述,大宛齐油气藏中液态烃应为中生界淡水湖相沉积有机质在高成熟演化阶段的产物。

3 油气成藏动态过程

3.1 油气地球化学信息

根据天然气地球化学分析结果,结合前人的研究成果,可以归纳出大宛齐油气田下列地质、地球化学信息。

1)大宛齐油气藏的原油和天然气均来自陆相沉积,即应该源于该区中生界的有机质。大宛109-7井原油的地球化学指标显示,其源岩为非煤系有机质,应属于湖相沉积有机质^[16],结合地质背景,应该属于侏罗系恰克马克组的湖相沉积有机质。

2)伴生液态烃为高成熟轻质油,应是正常凝析油阶段的产物。未获得气浸再调整的地球化学证据。

3) $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 高比值暗示,该油气中含有相对较深的挥发性物质。它们通过较大断裂运移到目前的储层中。而 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值显示大断裂的深度切穿了中生界。

4)在大宛齐油气成藏过程中,烃类先沿吐孜玛扎断裂运移后,再从北向南进入大宛齐构造^[21]。

5)气体组分和油气饱和度等显示,浅部气受断裂和封盖层剥蚀影响而发生轻组分的逸散,造成天然气在垂向上的下干上湿^[24]。

6)大北与大宛齐油气藏烃类均来自中生界烃源岩,有共同的演化过程^[25],差别在于聚集期。

3.2 成藏过程

大宛齐油气藏圈闭形成于库车组沉积期,其北侧吐孜玛扎断裂形成于下第三系沉积期。虽然吐孜玛扎断裂连通了三叠—侏罗系烃源岩和第三系及白垩系储层,但由于当时构造活动并没有在该区形成有效圈闭(图 5),导致三叠—侏罗系早期生成的油气没有得到有效的保存。

库车组沉积期由于该区的进一步沉降,南北向构造挤压力不断加强,吐孜玛扎断裂从规模和

强度上不断发育,此时大宛齐油气圈闭也逐步形成,下部烃源岩生成的相当于目前却勒 1 井的成熟油气沿断裂运移至上第三系康村组的圈闭中形成最早的油气藏。随着北部天山的进一步挤压,大宛齐盐拱逐渐增厚,成为现今库车地区膏岩层最厚的地区。这一演化结果一方面造成断裂切割深度不断加深,下伏烃源岩成熟度增高的烃类不断地向上运移;另一方面使上部圈闭的构造轴线(构造高点)不断北移,库车组沉积早期运移来的油气聚集在圈闭的南翼,造成南翼的天然气较湿,原油比重较大,自南向北比重变小,成熟度增高;同时,油气在垂向上还在向上运移。这些特征在天然气甲烷碳同位素组成与深度关系图中有明显的体现(图 6)。在库车组沉积中、晚期大北构造形成,且大北断裂与吐孜玛扎断裂连通其共同的烃源,天然气一部分沿大北断裂运移形成大北气藏,另一部分仍沿吐孜玛扎断裂和相应通道进入大宛齐。大宛齐盐拱在增厚过程中,背斜核部发育了 3 组正断层,3 组断层相互切割,形成了不同的断块^[18]。早期形成的油气占据了圈闭的下部空间,后期高成熟的油气沿 3 组正断层向上运移,依次在浅部形成油气藏,导致了上部后期天然气甲烷碳同位素偏重,也造成浅部油藏饱和程度低、由下向上油藏饱和程度降低的特点。

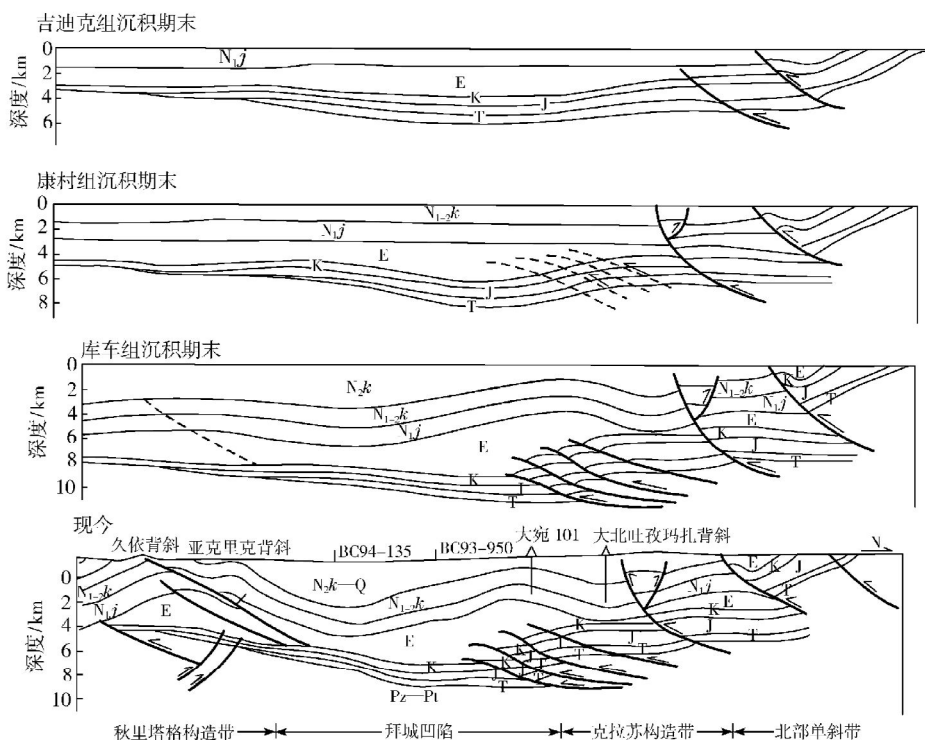


图 5 库车坳陷过大宛齐油田演化剖面

Fig. 5 Evolutionary section of Kuqa depression crossing Dawanqi oilfield

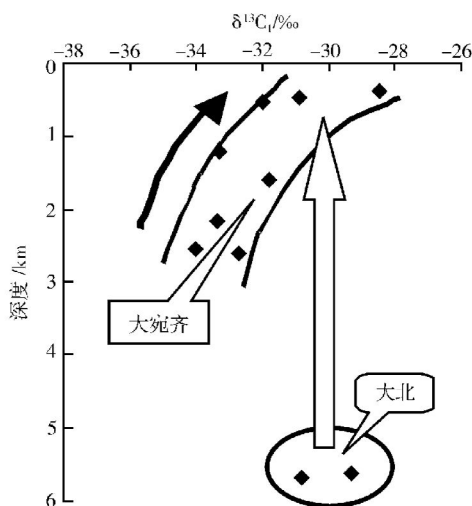


图 6 库车坳陷大宛齐油田天然气
甲烷碳同位素组成垂向变化

Fig. 6 Diagram showing vertical variation of carbon
isotopic composition of methane in natural gas
in Dawanqi oilfield, Kuqa depression

油气藏形成后期,该盐拱背斜核部曾被剥蚀,发生破裂,圈闭上层聚集侏罗系恰克马克组湖相泥岩所生成的高成熟天然气的油气藏由于压力等地质条件以及轻质组分沿破裂部分散逸等原因,形成现今饱和度较低的凝析气藏。

上述特征说明,大宛齐油田伴生气经历了一个由成熟到高成熟的充注过程。晚期充注的高-过成熟天然气密度较小,因而主要聚集在油藏的上方;早期形成的相对高密度的天然气向油藏下方聚集。

4 结论

1)大宛齐油气藏中 ^{38}Ar 的富集与缺氧流体及挥发分沿大断裂运移有关,吐孜玛扎断裂是流体活动形成的 ^{38}Ar 运移至油气藏的主要通道。而大北油气藏低的 ^{38}Ar 丰度显示气源就近成藏的特征。

2)大宛齐油气藏中的液态烃为中生界淡水湖相沉积有机质在成熟-高成熟演化阶段的产物。

3)大宛齐油气田伴生气经历了一个由成熟到高成熟的充注过程,为原生油气藏,并非后期气侵作用形成。且油气藏形成后期,因圈闭封闭能力弱造成气体轻组分沿破裂部分散逸,形成现今饱和程度较低的凝析气藏。

4)应用地球化学的基本原理和分析测试结果在地质体空间上的变化,结合基本地质作用过程,可以有效地反演成藏过程,也利于在更高层次上认识油气的来源、形成和演化,更好地进行油、气

源对比和烃源的动态追索。

参 考 文 献

- 1 Stahl W J, Carey Jr B R. Source rock identification by isotope analyses of natural gases from fields in the Val Verde Delaware basins, West Texas[J]. Chemical Geology, 1975, 16: 257-267
- 2 戴金星, 戚厚发, 宋岩. 鉴别煤成气和油型气等指标的初步探讨[J]. 石油学报, 1985, 6(2): 31-38
Dai Jinxing, Qi Houfa, Song Yan. Discussion to the guideline of coal type gas and oil type gas distinguishing[J]. Acta Petrolei Sinica, 1985, 6(2): 31-38
- 3 Chung H M, Gomil J R, Squires R M. Origin of gaseous hydrocarbons in subsurface environments: theoretical considerations of carbon isotope distribution[J]. Chemical Geology, 1988, 71: 71-103
- 4 沈平, 徐永昌, 王先彬, 等. 气源岩和天然气地球化学特征及成气机理研究[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991, 1-248
Shen Ping, Xu Yongchang, Wang Xianbin, et al. Study on geochemistry character of gas source rock and natural gas and mechanism of gas forming[M]. Lanzhou: Gansu Science & Technology Press, 1991, 1-248
- 5 徐永昌. 天然气成因理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1994, 1-414
Xu Yongchang. Origin theory and application of natural gas[M]. Beijing: Science Press, 1994, 1-414
- 6 王涛. 中国天然气地质理论基础与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997, 1-134
Wang Tao. China natural gas geology theoretical basis and practice[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997, 1-134
- 7 Hanson A D, Zhang S C, Moldovan J M, et al. Molecular organic geochemistry of the Tarim basin, Northwest China[J]. AAPG Bull, 2000, 84(8): 1109-1128
- 8 Zhang S C, Hanson A D, Moldovan J M, et al. Paleozoic oil-source rock correlations in the Tarim basin, NW China[J]. Organic Geochemistry, 2000, 31(4): 273-286
- 9 Zhang S C, Moldovan J M, Bian L Z, et al. Biological and molecular geochemical evidence for dinoflagellate ancestors in the Upper Sinian-Cambrian[J]. Acta Geologica Sinica, 2000, 74(4): 740-747
- 10 Schell M. The hydrogen and carbon isotopic composition of methane from natural gases of various origins[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1980, 44(5): 649-661
- 11 James A T. Correlation of natural gas by use of carbon isotopic distribution between hydrocarbon components[J]. AAPG Bull, 1983, 67(11): 1176-1191
- 12 Fan P, Philp R P, Li Z X, et al. Geochemical characteristics of aromatic hydrocarbons in crude oils and source rocks from different sedimentary environments[J]. Organic Geochemistry, 1990, 16(1-3): 27-435

(下转第 729 页)

- Yingqiong basin[J]. *Natural Gas Industry*, 1999, 19(1): 20–24
- 13 何自新, 付金华, 席胜利, 等. 苏里格大气田成藏地质特征[J]. *石油学报*, 2003, 24(2): 6–12
- He Zixin, Fu Jinhua, Xi Shengli, et al. Geological features of reservoir formation of Sulige gas field[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, 24(2): 6–12
- 14 翟爱军, 邓宏文, 邓祖佑. 鄂尔多斯盆地上古生界层序地层与储层预测[J]. *石油与天然气地质*, 1999, 20(4): 336–340
- Zhai Aijun, Deng Hongwen, Deng Zuyou. Sequence stratigraphy and reservoir prediction of Upper Palaeozoic in Ordos basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 1999, 20(4): 336–340
- 15 李文厚, 魏红红, 马振芳, 等. 苏里格庙气田碎屑岩储集层特征与天然气富集规律[J]. *石油与天然气地质*, 2002, 23(4): 387–391
- Li Wenhong, Wei Honghong, Ma Zhenfang, et al. Characteristics of detrital reservoirs and regularity of gas concentration in Suligemiao gas field[J]. *Oil & Gas Geology*, 2002, 23(4): 387–391
- 16 田冷, 何顺利, 顾岱鸿. 苏里格气田储层三维地质建模技术研究[J]. *天然气地球科学*, 2004, 15(6): 593–596
- Tian Leng, He Shunli, Gu Daohong. The use of 3-D reservoir geological modeling in Sulige gas field[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2004, 15(6): 593–596

(编辑 李 军)

(上接第 723 页)

- 13 刘文汇, 徐永昌. 煤型气碳同位素演化二阶段分馏模式及机理[J]. *地球化学*, 1999, 7(4): 359–366
- Liu Wenhui, Xu Yongchang. A two-stage model of carbon isotopic fractionation in coal gas[J]. *Geochimica*, 1999, 7(4): 359–366
- 14 陈孟晋, 胡国艺. 流体包裹体中气体碳同位素测定新方法及其应用[J]. *石油与天然气地质*, 2002, 23(4): 339–343
- Chen Mengjin, Hu Guoyi. A new method in assaying gas isotopes in fluid inclusion and the way of application[J]. *Oil & Gas Geology*, 2002, 23(4): 339–343
- 15 苟捷. 天然气烃指纹分析在气藏地球化学描述中的应用[J]. *石油与天然气地质*, 2004, 25(3): 349–354
- Gou Jie. Application of hydrocarbon finger print analysis to geochemical description of gas pools[J]. *Oil & Gas Geology*, 2004, 25(3): 349–354
- 16 陈晋阳, 张红, 肖万生. 有机油气形成的影响因素——模拟实验的研究进展[J]. *石油与天然气地质*, 2004, 25(3): 247–253
- Chen Jinyang, Zhang Hong, Xiao Wansheng. Factors affecting generation of organic origin petroleum: development of simulating experimental study[J]. *Oil & Gas Geology*, 2004, 25(3): 247–253
- 17 梁狄刚, 张水昌, 赵孟军, 等. 库车坳陷的油气成藏期[J]. *科学通报*, 2002, 47(增 1): 56–63
- Liang Digang, Zhang Shuichang, Zhao Mengjun, et al. Hydrocarbon sources and stages of reservoir formation in Kuqa depression, Tarim basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(S1): 62–70
- 18 赵靖舟. 前陆盆地天然气成藏理论及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003, 1–191
- Zhao Jingzhou. Reservoir theory of natural gas in foreland basins and its application[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003, 1–191
- 19 梁狄刚, 陈建平, 张宝民, 等. 塔里木盆地库车坳陷陆相油气的生成[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004, 1–265
- Liang Digang, Chen Jianping, Zhang Baomin, et al. Hydrocarbon generation from terrestrial sediments in Kuqa depression, Tarim basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004, 1–265
- 20 刘文汇, 徐永昌. 天然气中氦氩同位素组成意义[J]. *科学通报*, 1993, 38(9): 818–821
- Liu Wenhui, Xu Yongchang. The significance of He and Ar isotopic composition in natural gas[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(9): 818–821
- 21 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984, 1–548
- Liu Yingjun, Cao Liming, Li Zhaolin, et al. Element geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1984, 1–548
- 22 梅博文, 刘希江. 我国原油中异戊间二烯烷烃的分布及其与地质环境的关系[J]. *石油与天然气地质*, 1980, 1(2): 99–115
- Mei Bowen, Liu Xijiang. The distribution of isoprenoid alkanes in China's crude oil and its relation with the geologic environment[J]. *Oil & Gas Geology*, 1980, 1(2): 99–115
- 23 Radke M, Welt D H. The methylphenanthrene index (MPI): a maturity parameter based on aromatic hydrocarbon[J]. *Organic Geochemistry*, 1981, 12: 504–512
- 24 田作基, 张光亚, 邹华耀, 等. 塔里木盆地库车含油气系统油气成藏的控制因素及成藏模式[J]. *石油勘探与开发*, 2001, 28(5): 12–16
- Tian Zuojì, Zhang Guangya, Zou Huayao, et al. Tarim basin Kuqa petroleum system controlling factor and reservoir forming pattern[J]. *Petroleum Exploration & Development*, 2001, 28(5): 12–16
- 25 陈义才, 沈忠民, 李延钧, 等. 大宛齐油田溶解气扩散特征及其扩散量计算[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(2): 58–60
- Chen Yicai, Shen Zhongmin, Li Yanjun, et al. Simulation of diffusion quantity of solution gas in Dawanqi oil field[J]. *Petroleum Exploration & Development*, 2002, 29(2): 58–60

(编辑 李 军)