

文章编号: 0253-2697(2014)04-673-12 DOI:10.7623/syxb201404007

# 歧口凹陷滨海断裂带热流体活动及其对油气成藏的影响

龙华山<sup>1</sup> 向才富<sup>2,3</sup> 牛嘉玉<sup>1</sup> 魏立春<sup>2,3</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083; 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. 中国石油大学盆地与油藏研究中心 北京 102249)

**摘要:**热流体能够影响沉积盆地内物质组分的重新分配,如矿物的溶解和油气相态的变化,以及输导系统的热异常,通常沿断裂分布。滨海断裂带为控制烃源岩展布的断裂之一,同时也是流体热异常活动的场所。利用有机地球化学、流体包裹体、气体地球化学、成岩矿物及地层水化学特征等对研究区内流体的热活动进行了研究,为油气沿断裂发生运移和聚集提供了证据,进一步指明了油气勘探的有利方向。热流体沿断裂上涌发生热对流对局部温度场的改变体现在以下几个方面:①镜质体反射率异常反映局部烃源岩受局部温度场的变化发生热演化异常;②成岩期形成的流体包裹体均一温度大于其最大埋深时的温度;③黏土矿物出现同一深度段多类型和同一类型多层段的演化异常;④储层碎屑矿物颗粒的热蚀变。热流体对物质场的改变主要体现在以下几个方面:①热流体带来了深部慢源的无机CO<sub>2</sub>于浅层富集成藏;②大量高于卤水矿化度的深部流体渗入发生流体-岩石相互作用,导致储层中存在高矿化度的地层水;③储层早成岩期胶结于孔隙的碳酸盐类等矿物溶蚀形成多个次生孔隙带,进一步证实了水-岩相互作用,次生孔隙的发育来源于碳酸盐类矿物的溶解和重新分布,在一定程度上控制储层的物性;④热流体携带的大量物质发生流体-岩石相互作用导致靠近断裂带的岩石中所含微量元素异常。上述证据均指示了烃类流体能够沿断裂和渗透性砂岩储层发生运移,并可能聚集或成藏形成大油气田。

**关键词:**热流体活动;热效应;油气运移与聚集;歧口凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.12

文献标识码:A

## Hydrothermal fluid flow and its influence on the hydrocarbon migration and accumulation along Binhai fault in Qikou sag, Bohai Bay Basin

Long Huashan<sup>1</sup> Xiang Caifu<sup>2,3</sup> Niu Jiayu<sup>1</sup> Wei Lichun<sup>2,3</sup>

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China;  
2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;  
3. Basin and Reservoir Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** In sedimentary basin, hydrothermal fluid flow can affect the redistribution of materials (e. g., minerals dissolve in fluid and hydrocarbon dissolved in a basin) and the localized thermal anomaly along the pathway systems (most often faults). Binhai fault is one of the main boundary faults that controls the source rock distribution in Qikou sag, Bohai Bay Basin, which provides a space for flow anomalies of hydrothermal fluid. The investigation of hydrothermal fluid flow in Binhai fault bases on geochemical characteristics of organic materials, fluid inclusions, natural gases, diagenetic minerals, and formation water. Evidences for hydrocarbon migration and accumulation along the fault were obtained, with which a favorable direction for hydrocarbon exploration was pointed out. Hydrothermal fluid flow along the fault has created the abnormal high temperature field near the fault. Changes in local temperature field related to hydrothermal fluid upwelling along the fault were illustrated by the following evidences: (1) Abnormal vitrinite reflectance indicates abnormal thermal evolution of local source rocks; (2) Fluid inclusions with higher homogenization temperature than that formed at the maximal burial depth of the basin; (3) Clay minerals experienced abnormal evolution, with multi-types in the same depth segment and the same type in multi-segments; (4) Thermal alterations occurred in clastic mineral particles of the reservoirs. Changes in the material field caused by hydrothermal fluid flow were illustrated by the following evidences: (1) Inorganic CO<sub>2</sub> originating from deep mantle and brought upward by hydrothermal fluid flow was enriched and accumulated in shallow; (2) Substantial high-salinity deep fluids penetrated and reacted with source rocks, leading to the accumulation of high-salinity formation water in reservoirs; (3) Multiple segments of secondary porosity zone were developed vertically, further demonstrating the occurrence of water-rock interactions. Secondary porosity zones were resulted from the dissolution and redistribution of carbonate minerals, which to some extent controlled the physical properties of reservoirs; (4) Water-rock interaction with substantial materials carried by thermal fluids led to abnormal enrichment of trace elements in rocks adjacent to the fault. Together the above evidences indicate that hydrothermal fluids

**基金项目:**国家重大科技专项(2011ZX05006-005,2011ZX05006-006)和自然科学基金项目(No. 40872097, No. 41272161)资助。

**第一作者:**龙华山,男,1985年6月生,2009年毕业于长江大学资源勘查工程专业,现为中国石油勘探开发研究院博士研究生,主要从事石油天然气地质综合研究。Email:longhsh@qq.com

**通信作者:**向才富,男,1975年2月生,1997年毕业于中国地质大学(武汉)资源勘查工程专业,2003年获中国地质大学矿产普查与勘探专业博士学位,现为中国石油大学(北京)地球科学学院副教授,主要从事地质流体及其成矿与成藏作用研究。Email:xcf@cup.edu.cn



migrated along the fault and permeable sandstone reservoirs in the study area, with great potential for oil-gas accumulation.

**Key words:** hydrothermal fluid flow; hydrothermal effect; hydrocarbon migration and accumulation; Qikou sag; Bohai Bay Basin

盆地内的热流体是物质和能量的载体,并对盆内的能量场进行改造和物质交换,进一步对盆内温压场产生一定的影响,作用于储层的成岩-孔隙演化、有机质热演化和油气的生-运-聚等<sup>[1-7]</sup>。盆地内的热流体广义上包括油气烃类、 $H_2$ 、 $CO_2$ 、无机氦气,以及深部壳源的变质水、幔源的岩浆水等其他流体以压实流的方式由深至浅运移的流体<sup>[3,8]</sup>。孙永传、龚再升等定义温度高于 $75\sim 80^\circ C$ 且具有一定化学活泼性的地下流体为热流体<sup>[9,10]</sup>,且热流体的活动与超压的发育有关<sup>[4]</sup>。随着歧口凹陷勘探的深入,热流体活动引起的热异常对油气运聚成藏的影响引起了广泛关注,烃源岩热演化程度的异常、油气藏中无机 $CO_2$ 的富集、储层中油田水的分布异常以及黏土矿物的演化异常等等需要进一步深入分析。前人研究认为,流体的热活动强化了有机质的生烃作

用<sup>[11]</sup>,并且岩浆的热液活动和来自上地幔的富 $CO_2$ 热流体对古近系储层进行了改造<sup>[12]</sup>。笔者在吸收前人研究成果的基础上,结合地质、地球化学数据等相关资料进行分析,寻找盆地内存在热流体对温度场和物质场调整改造的证据,探讨了其对歧口凹陷油气成藏的影响。

## 1 地质背景

渤海湾盆地为发育在华北地台上的新生代裂谷盆地,岩石圈的伸展走滑在盆地内发育了一系列张性正断层和走滑断层为主的基底断裂<sup>[13,14]</sup>。歧口凹陷属于渤海湾盆地黄骅坳陷的一个次级构造单元,位于黄骅坳陷的中东部,西北边界以沧东大断裂与沧县隆起相接,南部上超在埕宁隆起之上,东部在海域以沙垒田凸起与渤中坳陷相隔,北部与燕山褶皱带相邻(图1)。

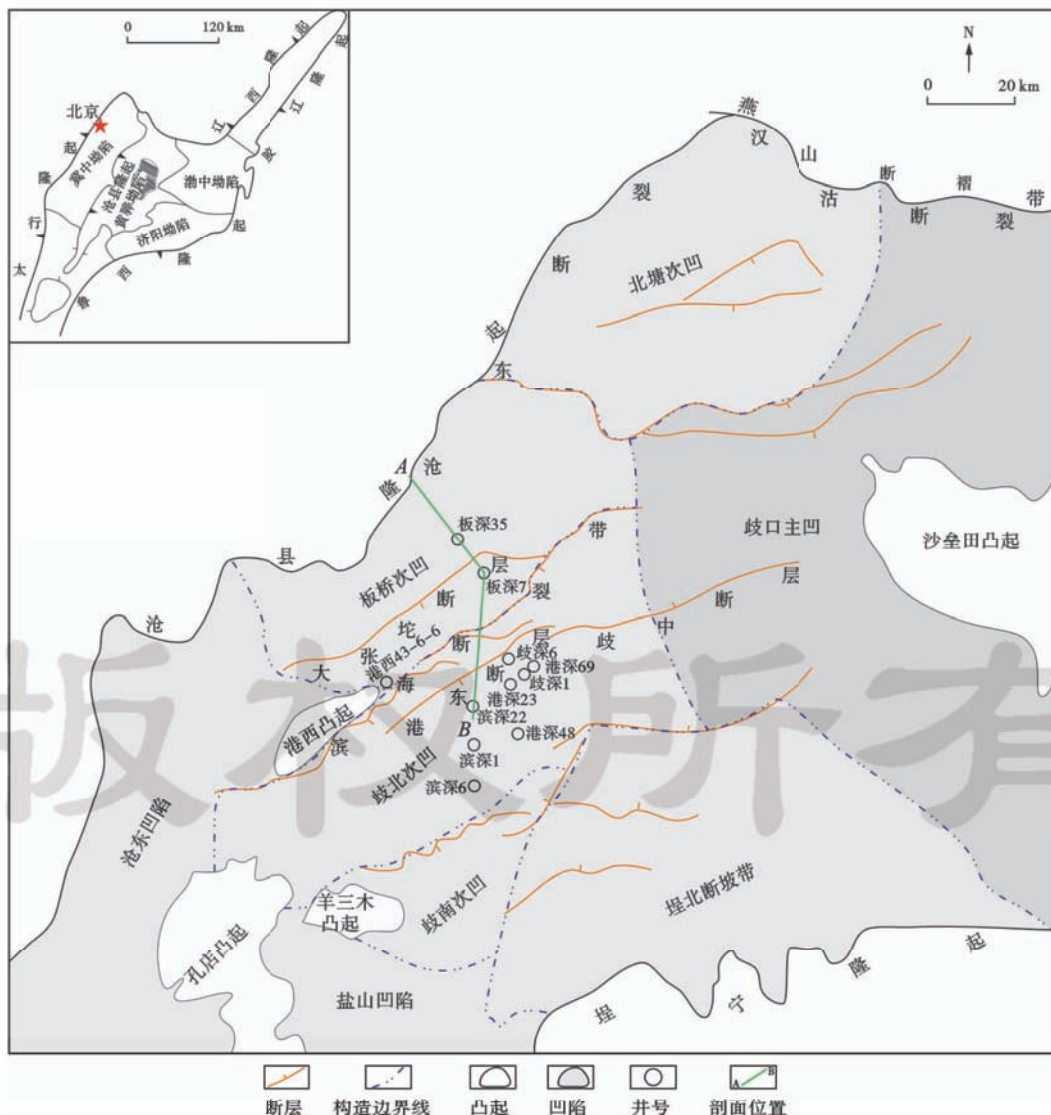


图1 歧口凹陷构造单元划分

Fig. 1 Tectonic unit division of Qikou sag, Bohai Bay Basin



始新世受 NW—SEE 向区域伸展作用发育 NE—NNE 向主干断层;渐新世 NW—SEE 向区域伸展作用强度减弱,NNE 向深大断裂发生右旋走滑诱导形成近 EW 向正断层;新近纪 NW—SEE 向区域伸展作用停止,NNE 向深大断裂发生右旋走滑作用为主,形成大量近 EW 向正断层<sup>[15,16]</sup>。滨海断裂带由 NE 向的滨海断层、港东断层、大张坨断层、唐家河断层和近 EW 向的港 80 断层、歧中断层等组成,其控制着凹陷内烃源岩发育和热演化程度<sup>[17,18]</sup>。古近纪断层活动强烈,新近纪断层活动减弱<sup>[17,19]</sup>。歧口凹陷新生代经历了先断后拗的演化阶段,区内地层齐全,自下而上发育有古近系沙河街组(E<sub>2</sub>s)和东营组(E<sub>3</sub>d)、新近系馆陶组(N<sub>1</sub>g)和明化镇组(N<sub>2</sub>m)、第四系平原组(Qp)。沙河街组(E<sub>2</sub>s)又可分为沙河街组三段(简称沙三段,E<sub>2</sub>s<sub>3</sub>)、沙河街组二段(简称沙二段,E<sub>2</sub>s<sub>2</sub>)和沙河街组一段(简称沙一段,E<sub>2</sub>s<sub>1</sub>)。其中以沙三段和沙一段暗色泥岩为主要烃源岩,沙河街组和东营组为主要的含油层系<sup>[20-22]</sup>。由于歧口凹陷上述构造和沉积充填特征,导致盆内多期的热流体活动,对盆地内的能量场和物质场进行调整改造,并影响着研究区的油气成藏。

## 2 热流体活动调整温度场的证据

### 2.1 地温特征和烃源岩热演化程度

歧口凹陷地温梯度经历了由高到低的演化过程,沙河街组沉积期为 5.10~5.16 °C/hm,东营组沉积期为 4.15~5.10 °C/hm,馆陶组和明化镇组沉积期为 3.15~4.15 °C/hm<sup>[23]</sup>。龚育龄等对同属渤海湾盆地的济阳拗陷研究认为 65 Ma 以前古大地热流值为 79.5 mW/m<sup>2</sup>,至 32.8 Ma 古热流值降至 66.8 mW/m<sup>2</sup>;24.6~15.6 Ma 时古热流值升高,达到 73.8 mW/m<sup>2</sup>,

随后降低至现今 65.8 mW/m<sup>2</sup><sup>[24]</sup>。统计研究区内断裂带的地层测试温度发现,沿垂深上地层温度存在分段性,多数为正常的盆地背景地温梯度,在断裂带附近的深、浅层存在部分因热传导叠加热对流形成的异常地层温度,如在 1525 m、2347.3 m 和 3737.79 m 的深度出现地层温度分别为 95 °C、146 °C 和 179 °C 的高温(图 2)。热对流在深大断裂沟通的地层中发生,原本正常的温度场叠加了热对流温度场,导致局部温度异常,进一步影响有机质的热演化。

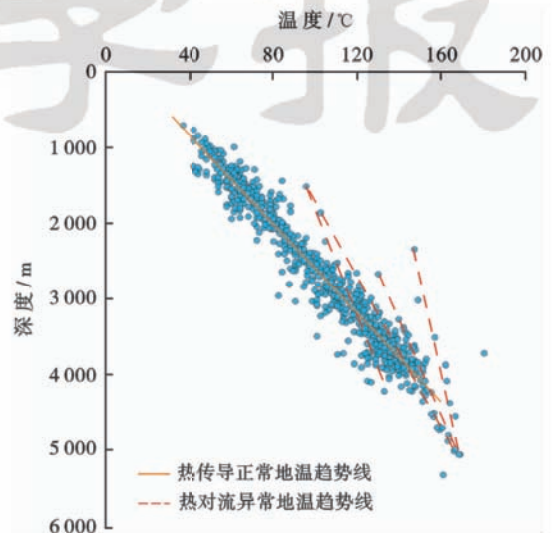


图 2 研究区地层温度分布

Fig. 2 Geothermal temperature distribution in Qikou sag

热流体活动影响盆地局部温度场的变化,会促进烃源岩的热演化<sup>[1-7]</sup>。歧口凹陷大部分样品的镜质体反射率随深度增加而增大,反映其在热传导的正常温度场背景下烃源岩的热演化,因而热演化程度与埋藏深度具有很好的线性关系,但部分烃源岩的热演化出现异常,其生烃门限深度较低(图 3)。歧口凹

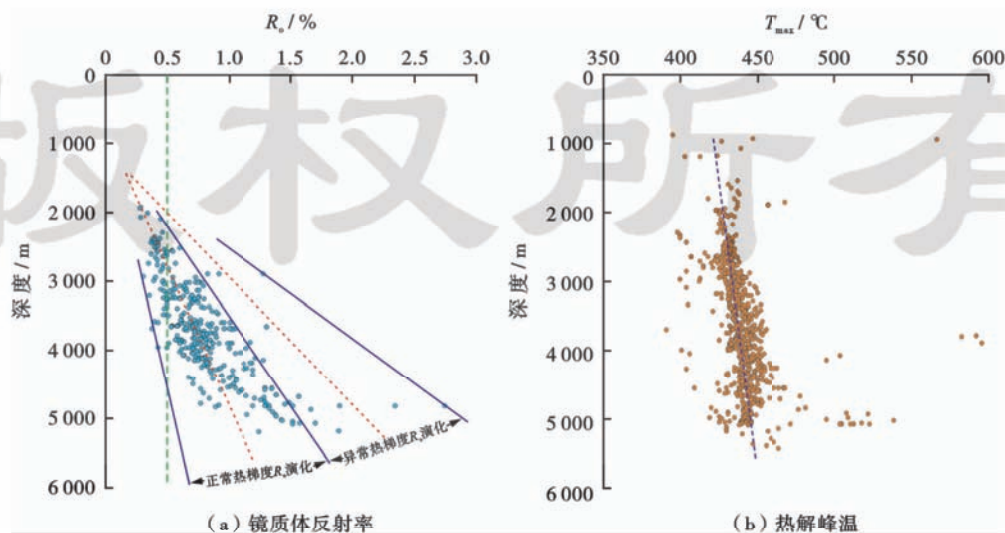


图 3 歧口凹陷源岩镜质体反射率和热解峰温随深度变化

Fig. 3 Vitrinite reflectance of source rock and pyrolysis peak temperature changes with depth in Qikou sag

陷烃源岩正常热演化的生烃门限深度平均约为 2 600 m,而热演化异常的生烃门限深度变浅,到 1 800 m 就已经进入生油窗内(图 3)。沿断裂带方向,部分距断裂带近的区域因受热流体所携带的热能的影响,地层温度场易发生异常,且相对大断裂带越近,烃源岩

的热演化程度受其影响越大。如距港东断裂近的歧深 1 井和歧深 6 井受异常温度场的作用明显,烃源岩演化程度较高,而相比较远的滨深 22 井和港深 48 井的烃源岩热演化程度更接近正常地温场下的热演化程度(图 4)。

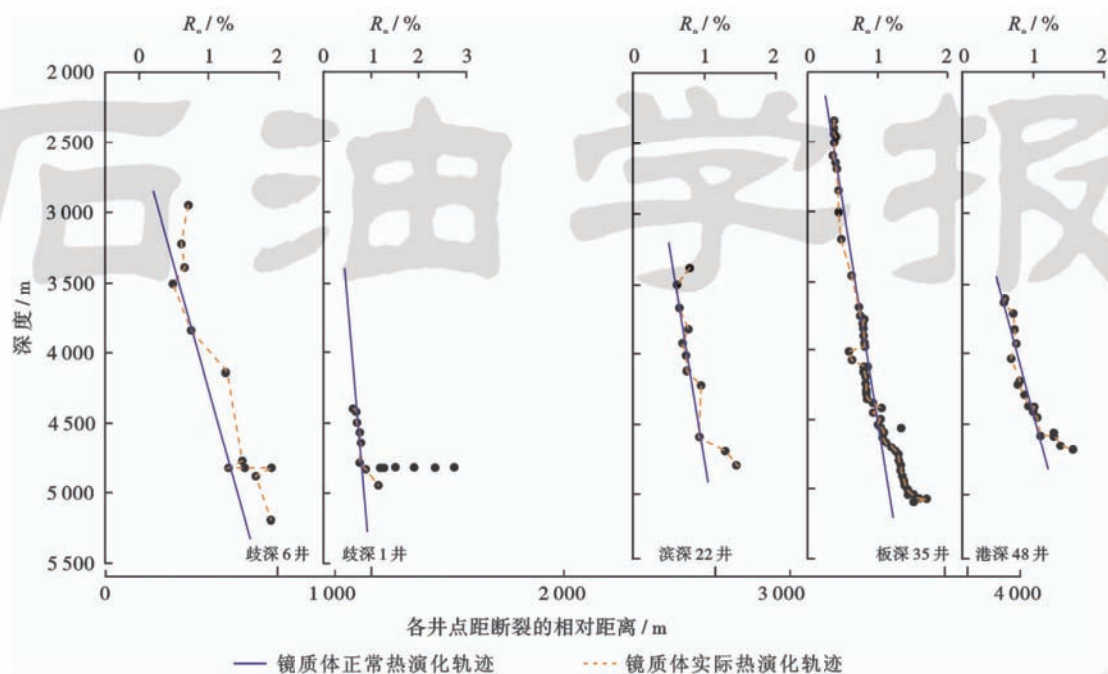


图 4 单井源岩镜质体反射率随深度变化

Fig. 4 Vitrinite reflectance of source rock changes with depth

## 2.2 流体包裹体均一温度

流体包裹体记录了热流体的活动,为热流体活动的直接证据<sup>[4]</sup>。对歧口凹陷各沉积期地层埋深所经历最大温度的模拟[图 5(a)],结合实测的储层流体包裹

体均一温度可知:正常包裹体温度与井温在同一直线上,反映了该成岩期流体包裹体形成时的温度;部分井或地层中的流体包裹体均一温度记录了早期浅埋藏成岩时的温度;部分井或地层的流体包裹体均一温度在

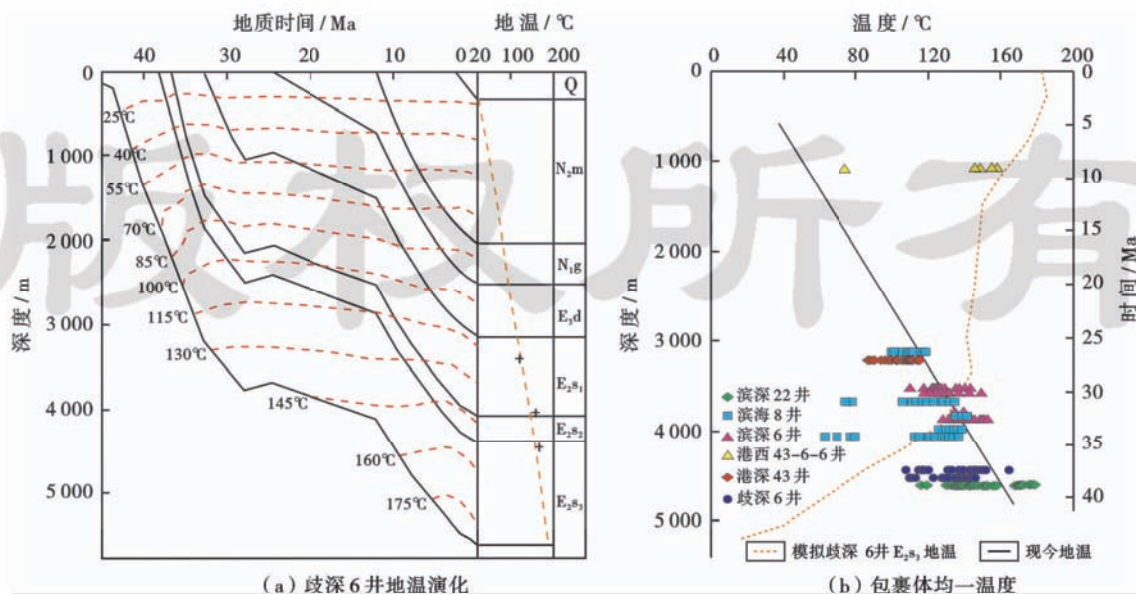


图 5 研究区包裹体均一温度与现今正常地层温度

Fig. 5 Comparison between homogeneous temperatures of fluid and present geothermal temperature



同一埋藏深度或埋藏深度不大时却相差很大,甚至部分地层的流体包裹体均一温度大于对应地层最大埋深时所经历的温度[图5(b)]。滨海断层临近的浅层出现了高温包裹体,在港西43-6-6井埋深1074.2m的明化镇组砂岩储层的石英次生加大缝中出现了148~159℃的高温包裹体,包裹体为伴烃共生,呈串珠状分布,均一温度远远大于其最大埋深时所经历的地层温度[图5(b)]。滨海断裂带附近部分井段也出现了高于同深度所经历最大地温的次生包裹体,而歧深6井的地温模拟结果揭示了现今的地温即为地层所经历的最大地温[图5(a)]。

### 2.3 黏土矿物

黏土矿物在碎屑岩成岩作用过程中的形成和演化受母岩类型、局部地温异常、水介质等多种因素的影响<sup>[25]</sup>。形成伊利石、绿泥石与高岭石的水介质条件存在差异:当孔隙水偏碱性时,富 $K^+$ 蒙脱石向伊利石转化,富 $Fe^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 易向绿泥石转化;当孔隙水为酸性时,蒙脱石易转换成高岭石<sup>[26,27]</sup>。

对歧口凹陷30口井共计319个砂岩样品进行黏土矿物分析,主要包括伊/蒙混层、伊利石、绿泥石和高岭石4类矿物,其含量最大值分别为87%、93%、67%和65%,伊/蒙混层中蒙脱石的相对含量介于10%~70%(图6)。深度段为1800~2200m,伊/蒙混层中蒙脱石

的相对含量由最大值70%随深度逐渐减少,表明蒙脱石已向无序伊/蒙混层转化。而伊/蒙混层、伊利石和高岭石的含量在该深度段内均出现了异常高值,伊/蒙混层的最大含量达到80%,伊利石的最大含量近60%,高岭石的含量高达70%。2800~4000m深度段,高岭石和绿泥石的含量再次出现异常,此深度段内烃源岩大量生烃产生的有机酸不利于碱性介质条件绿泥石的存在,绿泥石的含量反而高达67%。4700~4800m深度段内,伊/蒙混层中几乎不含蒙脱石,伊/蒙混层、伊利石和绿泥石的含量均较高的同时,高岭石的含量再次出现了一个小高峰(图6)。综合分析认为:浅层黏土矿物含量异常,是由盆地内广泛发育的断裂决定的,浅层断裂的沟通导致地表水的下渗引起了浅层水介质呈弱酸性,因而浅层高岭石的含量出现了异常;中深层处于生烃窗内的酸性介质条件下,绿泥石含量的异常归因于深大断裂的作用,深部流体沿这些深大断裂带来了大量的 $Fe^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 等组分,同时产生的局部异常高温场也促进绿泥石的形成;深层高岭石含量的异常归因于热流体的多期次活动,热流体将深部原本偏碱性的介质环境改造成偏酸性,促进了部分高岭石的形成。同时,黏土矿物中对热最敏感的矿物即伊/蒙混层的含量异常同样指示了热流体活动的多次发生。不同介质条件不同温度场形成的不同类型黏土矿物的共存指示了热流体的多期次活动。

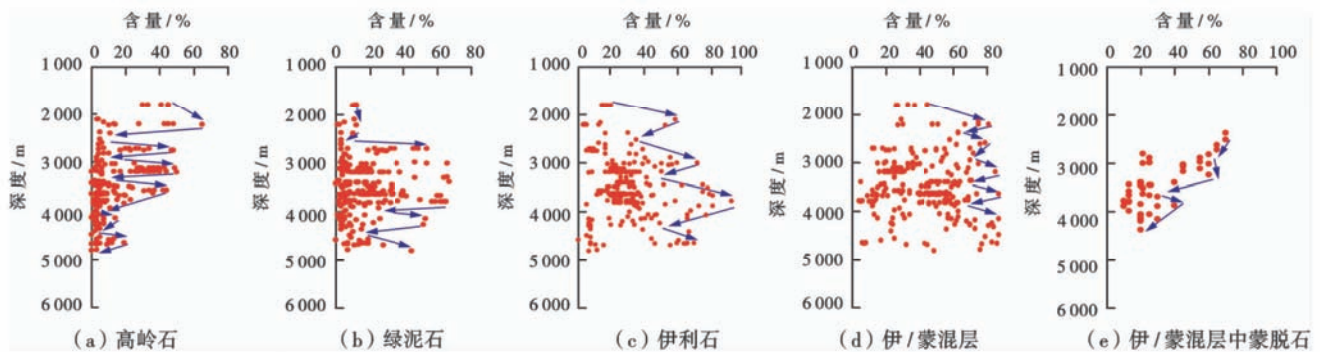


图6 歧口凹陷黏土矿物随深度演化特征

Fig. 6 Changes in clay minerals with depth in Qikou sag

### 2.4 碎屑颗粒的热蚀变

除热流体对烃源岩以及储层中黏土矿物的影响外,其产生的温度场还影响着储层中碎屑颗粒的溶蚀作用和胶结作用。研究区内的砂岩以岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩为主,大量的长石矿物在热流体活动携带的酸性介质条件下易发生热蚀变。长石热蚀变的产物分为2部分:①转化为高岭石,这也是高岭石含量在垂向上出现多层段异常的原因之一;②转化成自生石英,伴随孔隙水在石英颗粒边缘形成次生加大和填充早期形成的裂缝及溶孔中,而伴随石英加大形成的高温包裹体也间接证实了热流体对储层碎屑颗粒的热蚀

变过程。研究区存在2期包裹体:①分布在石英次生加大边内侧或加大边早期裂缝中;②分布于碎屑颗粒及次生加大边外侧或加大边晚期裂缝中<sup>[18,28]</sup>。前人对港深42井中的砂岩矿物颗粒及其胶结物的阴极发光特征研究,证实了研究区内的碎屑颗粒受过热流体的作用<sup>[12]</sup>。

## 3 热流体活动影响物质场的证据

### 3.1 无机 $CO_2$

根据二氧化碳的碳同位素特征判别其成因: $\delta^{13}C$ 大于-8‰为无机成因,小于-10‰为有机成因,介于



两者之间为有机和无机混合成因<sup>[29]</sup>。研究区天然气组分中 CO<sub>2</sub> 的碳同位素值  $\delta^{13}\text{C}$  均大于  $-8\text{‰}$ , 具有无机成因的特征(表 1 和图 7)。前人对研究区内无机 CO<sub>2</sub> 的研究认为其来源于深部幔源<sup>[29-33]</sup>, 而深部幔源的 CO<sub>2</sub> 气只能靠深大断裂提供运移通道, 伴随着热流体向浅层运移于浅部发生聚集, 并对浅层油气藏的组分进行调整改造, 将原本有机成因的油气藏改造成含有无机 CO<sub>2</sub> 的混合成因的油气藏或驱替原有油气藏形成无

机成因的 CO<sub>2</sub> 气藏。滨海断裂带是盆地内一条控凹的二级深大断裂带, 在其附近区域内出现无机 CO<sub>2</sub> 气的聚集或部分 CO<sub>2</sub> 气藏, CO<sub>2</sub> 含量在气组分中最高可达 90% 以上(表 1 和图 7)。这些无机 CO<sub>2</sub> 气主要分布在深大断裂的交汇处以及持续发育的深大断裂带附近, 如靠近滨海断裂带西段的港 151 井 CO<sub>2</sub> 含量达 98.61%。随深部热流来源的无机 CO<sub>2</sub> 不仅改变了油气的组分, 还在一定程度上对储层的物性具有改善作用<sup>[12]</sup>。

表 1 歧口凹陷天然气组分及碳同位素特征

Table 1 Composition and carbon isotope characteristics of natural gas in Qikou sag

井号	井深/m	组分含量/%				碳同位素/‰		数据来源
		N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> <sup>+</sup>	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$	$\delta^{13}\text{C}_1$	
港 151	1632~1639	0.19	98.61	1.17		-3.77	-28.6	文献[30]
港 87		0.30	88.10	11.00	0.28			
港 138	1462~1467		18.93	66.86	14.07	-7.1	-43.86	
港西新 8-8	1035~1198	0.98	21.36	71.59	6.07	-3.51	-45.83	
港西 10-7	1345~1406	1.34	21.88	67.12	9.66	-7.4	-51.03	
港 23	1774~1877		20.86	63.37	14.84	-7.72	-44.30	
港西 13-6-2	1087~1094		4.72	91.98	3.27	-8.86	-49.55	
港西 9-12	899~908	0.47	17.42	81.23	0.88	-0.4	-49.98	文献[32]
港西 6-6-1		0.86	11.21	83.97	3.89	1.58	-44.46	
港西 47-4	1012~1179	1.25	11.22	82.27	5.25	1.72	-43.34	
港深 7	3496~3514	0.61	1.44	85.75	12.2	-1.63	-38.26	
港 49	2544~2584	1.27	1.07	90.72	6.94	-2.81	-38.26	
滨浅 8	702.6~705.6	0.57	1.24	98.00	0.20	11.1	-42.30	
滨深 6	3552.1~3574.3	0.09	2.53	78.88	18.48	0.07	-41.3	
滨深 19x1	3927.9~3934.9	0.31	1.47	83.55	14.66	-5.3	-39.8	
歧深 8x1	5011.7~5077.3	0.33	6.82	80.88	11.97	0.6	-34.6	
滨深 22	4493.5~4547.5	0.06	3.17	83.42	13.34	-4.7	-41.6	
	4615.1~4663.4	0.06	2.06	85.11	12.77	-0.8	-40.6	
滨深 3x1	5465.0~5472.2	0.20	2.94	80.64	16.23	-2.308	-37.5	
滨海 28	4328.9~4338.9	0.10	1.92	86.47	11.50	1.7	-37.6	
滨海 4	5385.4~5467.6	0.30	5.58	80.82	13.31	-1.5	-39.6	

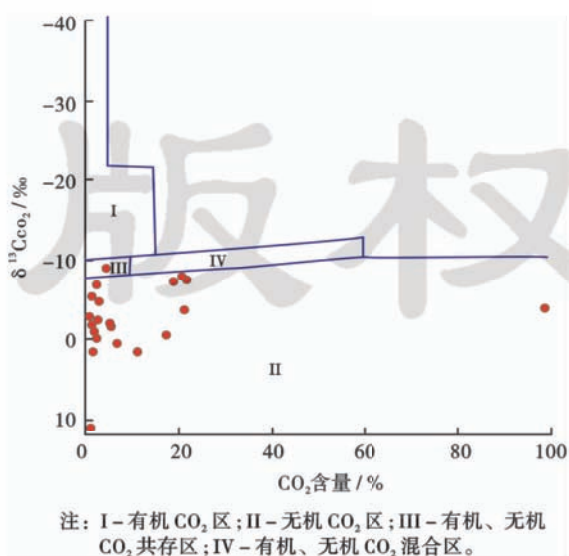


图 7 歧口凹陷天然气中 CO<sub>2</sub> 含量与其碳同位素关系<sup>[29]</sup>

Fig. 7 Relationship between CO<sub>2</sub> content and its carbon isotopes in Qikou sag

### 3.2 地层水矿化度

地层水的化学性质受多种因素的影响: ①原始沉积水; ②隔层; ③大气降水, 矿物的结晶水及其演化过程中的脱水, 有机质生烃过程产生的水; ④地表水的渗入或深层流体的上涌<sup>[34]</sup>。研究区内地层水矿化度较高, 大部分都分布在 10 g/L 以上, 而部分井的矿化度远远大于海水的矿化度 (35 g/L)。如港深 69 井在 3919~3935 m 深度段内的沙一段地层水的矿化度高达 62.197 g/L, 滨深 1 井、港深 18 井、港深 23 井、港深 48 井及歧深 1 井在沙二段和沙三段地层中均出现了高矿化度的地层水, 最大矿化度高达 220.078 g/L(图 8)。埋深大于 3000 m 的地层中仅靠原始沉积水或地层中产生的流体与岩石相互作用不可能产生大于 50 g/L 的高矿化度地层水, 同时也不可能因分隔层阻止流体的交换导致地层水矿化度的大幅增高。这些产出异常高矿化度地层水的井主要分布于滨海断裂带附近, 综

合分析认为这些异常高矿化度地层水的形成受深部上涌的高矿化度卤水的影响,在断裂以及热流体活跃期,

这些高矿化度卤水沿深大断裂进入到储层之中并与围岩发生作用。

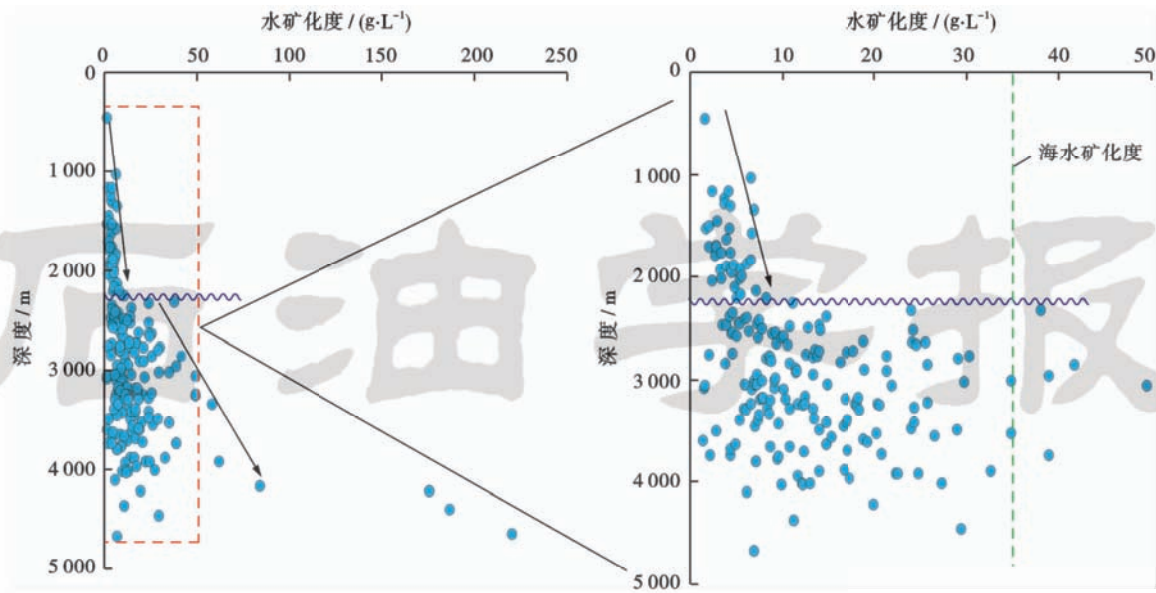


图 8 歧口凹陷地层水矿化度随深度分布

Fig. 8 Vertical distribution of formation water salinity in Qikou sag

### 3.3 次生孔隙带的演化

歧口凹陷储集层随埋深存在 4 个孔隙发育段: 2500 m 以浅的原生孔隙段, 2700~3000 m、3500~3650 m 和 4450~4600 m 深度段的 3 个次生孔隙段<sup>[35]</sup>。储层次生孔隙的发育与流体的活动密不可分, 而热流体的活动及其化学性质决定了次生孔隙的发育深度和分布层位。位于生油窗内, 有机质生烃产生的

大量有机酸、CO<sub>2</sub> 的酸性流体易溶蚀早期的碳酸盐胶结物形成第一段次生孔隙带, 响应于储层孔渗性变好和碳酸盐含量的减少(图 9)。而大于 3500 m 的深层, 受热流体的对流以及单套储层内的热流体循环, 储层中碳酸盐类矿物及胶结物发生进一步溶蚀和重新分布, 形成多个次生孔隙带和碳酸盐类矿物含量高值带。

碳酸盐类胶结物在热流体的作用下易发生溶解,

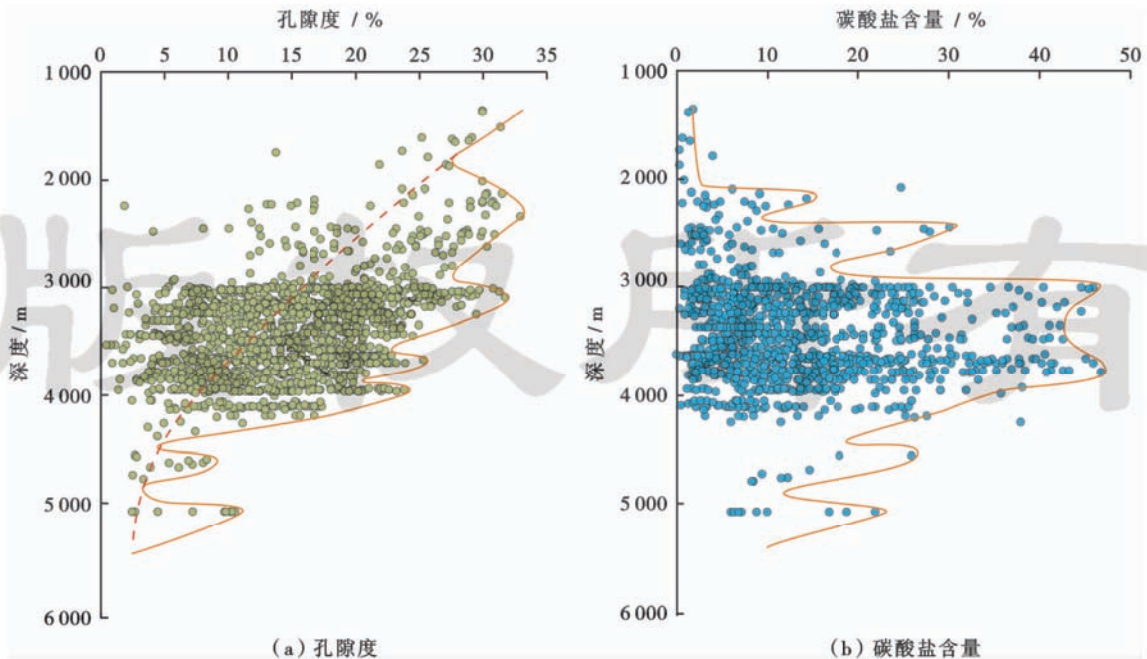


图 9 歧口凹陷储层孔隙度和碳酸盐含量随深度变化

Fig. 9 Vertical distribution of porosity and carbonate minerals in sandstone reservoirs in Qikou sag



并随热流体与围岩孔隙中的流体发生热差对流。热流体携带着溶蚀后的碳酸盐矿物进入温度和  $\text{CO}_2$  分压降低的孔隙中,因为温度、盐度和  $\text{CO}_2$  分压的降低,含碳酸盐类流体饱和,发生碳酸盐类矿物的重新沉淀,若流体中有大量的  $\text{Fe}^{2+}$  存在则形成大量铁白云石。在这种热对流影响下,砂岩储层中次生孔隙发育的同时,碳酸盐类含量也较高。研究区内砂岩储层因受沉积相控制,其单层厚度较薄,受热流体对流的影响,在砂岩层的上倾方向因热流体温度和  $\text{CO}_2$  分压降低而发生碳酸盐类矿物的胶结,在其上倾方向因碳酸盐类胶结物的存在导致储层致密化并对油气形成封堵,下倾方向受热流体溶蚀形成粒间孔并发育好的储层。在有油源断裂沟通或烃源岩接触的条件下,这类砂岩储层易发生油气聚集形成相关的岩性地层油气藏。

### 3.4 微量元素

热流体活动所携带的大量无机组分在输导体系中发生垂向上涌和侧向渗流的过程中,与围岩接触必然会发生流体与岩石间的离子交换,其结果是部分泥岩或砂岩层中,甚至地层孔隙流体中的微量元素出现异常高的含量。歧深 1 井 4195~5066 m 的 43 个泥岩样品中的微量元素含量特征是:Cu 含量介于 500~2268  $\mu\text{g/g}$ ,平均含量为 1145.08  $\mu\text{g/g}$ ;Ni 含量介于 10~42  $\mu\text{g/g}$ ,平均含量为 22  $\mu\text{g/g}$ ;B 含量介于 43~129  $\mu\text{g/g}$ ,平均含量为 86.7  $\mu\text{g/g}$ ;V 含量介于 58~110  $\mu\text{g/g}$ ,平均含量为 84  $\mu\text{g/g}$ ;Zn 含量介于 185~2001  $\mu\text{g/g}$ ,平均含量为 841  $\mu\text{g/g}$ 。其他井区的砂岩样品中 Cu 的含量介于 58~154  $\mu\text{g/g}$ ,平均含量为 131  $\mu\text{g/g}$ ;Ni 含量介于 3.2~5.2  $\mu\text{g/g}$ ,平均含量为 4.3  $\mu\text{g/g}$ ;Zn 含量介于 20.8~57.0  $\mu\text{g/g}$ ,平均含量为 35.3  $\mu\text{g/g}$ 。港深 10 井和港深 23 井的原油灰分中 Ni 的含量分别达到 50  $\mu\text{g/g}$  和 10  $\mu\text{g/g}$ ,Cu 含量达到 84.0  $\mu\text{g/g}$  和 177.5  $\mu\text{g/g}$ 。曾溅辉等认为东营凹陷受到了热流体活动影响的泥岩中 Cu、Zn、Ni、V 的平均含量分别为 6.1  $\mu\text{g/g}$ 、84.37  $\mu\text{g/g}$ 、50.03  $\mu\text{g/g}$ 、305  $\mu\text{g/g}$ ,砂岩中 Cu、Zn、Ni 的平均含量分别为 50  $\mu\text{g/g}$ 、121.9  $\mu\text{g/g}$ 、30.8  $\mu\text{g/g}$ <sup>[36]</sup>。张义刚等报道了页岩中的 Cu、Zn、Ni、V 的世界平均值分别为 45  $\mu\text{g/g}$ 、95  $\mu\text{g/g}$ 、68  $\mu\text{g/g}$ 、130  $\mu\text{g/g}$ ,以及琉球岛弧海底火山热液沉积的 Cu、Zn、Ni 含量为 134  $\mu\text{g/g}$ 、515  $\mu\text{g/g}$ 、600  $\mu\text{g/g}$ <sup>[37]</sup>。上述泥岩、砂岩以及原油中的部分或大多数微量元素含量明显超过已报道的结果,这些元素含量的异常只能由深部流体带来并发生了热流体-岩石的相互作用形成。

## 4 热流体活动对油气成藏的影响

沉积盆地内的热流体是物质和能量的载体,流体

作为活跃的介质必然影响盆地内的油气生-运-聚过程。烃源岩生烃的关键因素是温度和时间,当温度不足时可以通过延长时间来弥补,当温度场出现局部高异常时可以缩短烃源岩成熟的时间,甚至强化其热演化程度,降低生烃门限的深度。根据反应烃源岩成熟度的参数即镜质体反射率( $R_o$ )和热解峰温( $T_{\text{max}}$ )等,正常地温热传导下的烃源岩生烃门限深度平均约为 2600 m,但由于断裂沟通热对流的存在,断裂附近正常热传导的地温上叠加了热对流温度,使得生烃门限深度降至 1800 m 甚至更低。根据正常地温梯度判断为未熟—低熟的烃源岩可能受热流体的影响已经达到了成熟—高成熟,从某种程度上烃源岩的有效面积得到扩展,油气勘探领域扩大。原本认为生油主凹位于盆地的沉积沉降中心如岐口主凹、歧北次凹和板桥凹陷的深凹带逐渐扩展到受深大断裂带控制的歧北次凹和板桥凹陷边缘。

热流体对储层的改造体现在垂向上形成多层段次生孔隙发育带,并为寻找深层油气提供了可能。以滨海断裂带为例,港东断层、滨海断层以及大张坨断层持续活动,为热流体的上涌提供了通道。热流体对储层的影响表现在深层次生孔隙的发育和黏土矿物的异常演化,板深 35 井在深度 3790 m 的孔隙度达 18.4%,而滨深 22 井在 3966 m 的深度最大孔隙度为 10.79%。砂岩储层中黏土矿物含量距断裂的远近变化可揭示断裂作为热流体的活动通道,距断裂近的区域深、浅层均出现高岭石、伊利石、绿泥石的高异常含量,距断裂近且大于 3500 m 的深度内出现了高岭石含量大于 50%,绿泥石含量大于 60%,伊利石和伊/蒙混层的含量大于 90%(图 10)。

热流体的活动与断裂有关,断裂活动期内热流体也相对活跃。东营组和明化镇组沉积期为歧口凹陷油气成藏的两个重要时期<sup>[18,28]</sup>,结合研究区内断裂的活动特征,持续活动的断裂如滨海断层、港东断层和大张坨断层在东营组沉积期时活动强度最大(图 11)。在油气成藏关键时刻,热流体沿断裂垂向上涌和侧向扩散的通道也是油气运聚的通道,现今已发现的油气主要分布于断裂两侧就是其最好的佐证。热流体活动带来了深部无机  $\text{CO}_2$  于浅部聚集,形成有机无机混合成因的油气藏特征,同时部分井富集形成纯无机  $\text{CO}_2$  气藏如港 151 井和港 87 井的无机  $\text{CO}_2$  气藏。热流体的无机  $\text{CO}_2$  气体组分不仅对油气藏进行调整改造,因其为酸性流体的特性对油气藏赋存的储层也具有影响,而热流体中的其他组分在与围岩的相互作用中也改造油气藏的储存环境。

除上述影响外,热流体对压力场的形成演化也具



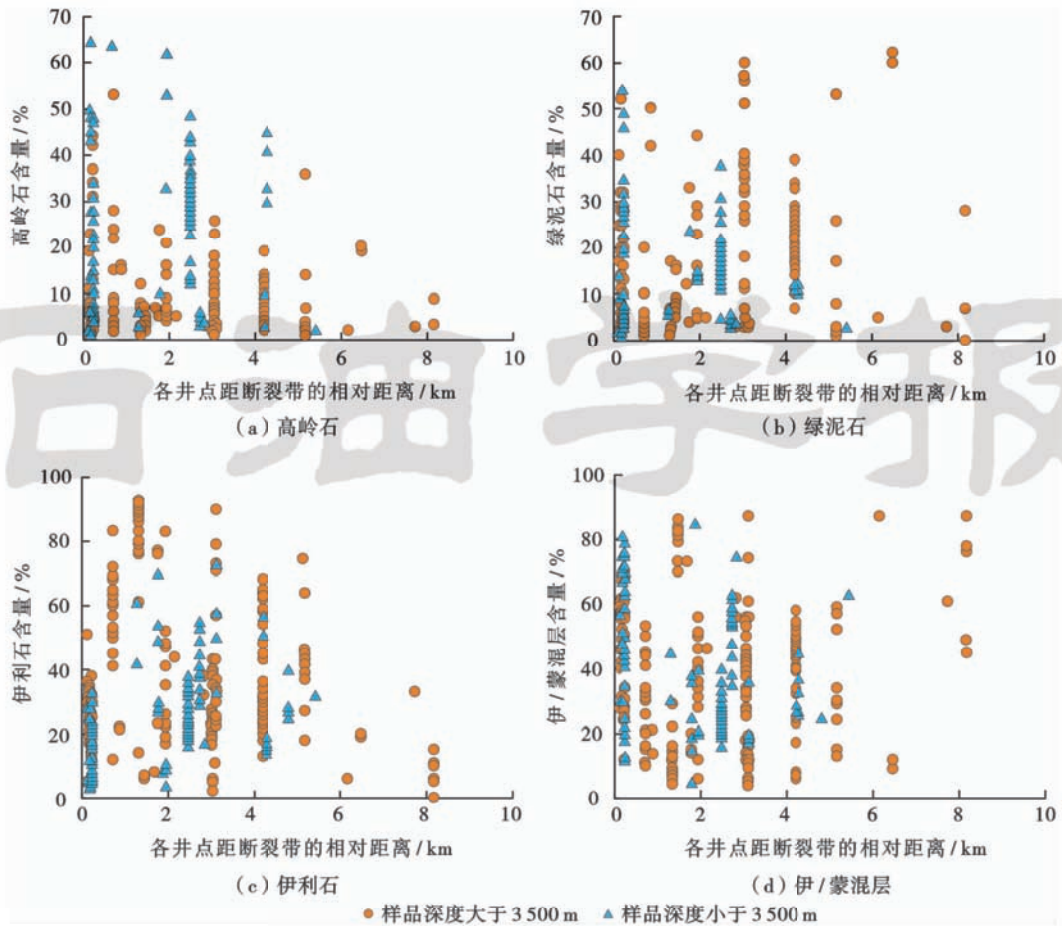


图 10 歧口凹陷黏土矿物含量沿断裂带的分布特征

Fig. 10 Distribution of clay mineral content along Binhai fault in Qikou sag

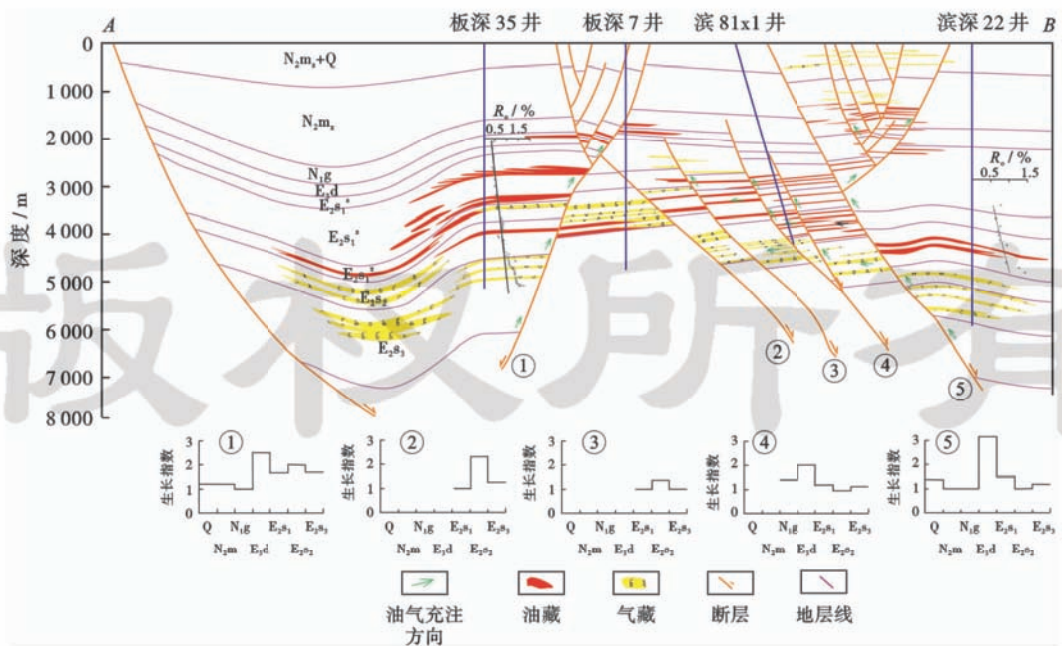


图 11 歧口凹陷斜坡区油气成藏模式(剖面位置见图 1)

Fig. 11 Hydrocarbon accumulation pattern of the slope area in Qikou sag(location see Fig. 1)



有重大影响。板深 35 井和滨深 22 井产油气的深层均发育超压,压力系数分别为 1.28 和 1.4。深部高温高压流体以及油气成藏期产生的烃类以深大断裂作为通道发生泄压或压力传递。东营组沉积期末,渤海湾盆地整体抬升,研究区早期生成的油气随高压热流体沿开启的断裂发生泄压,在浅层形成了常压或超压油气藏;明化镇组沉积期之后,断裂活动减弱,深部热流体的热传导发生热增压在深层形成了压力封存箱并富集了深部高压的油气,从而形成了现今深层超压浅层常压的两大油气成藏体系(图 11)。

歧口凹陷内的主要控凹断裂具有分期分段活动的特征<sup>[17,19]</sup>,断裂分段活动强度的不同造成了热流体沿断裂方向的运移规模和活动强度的差异,沿滨海断裂带油气成藏的各地质条件受热流体的影响也不同。滨海断层带港西段断层活动强度大,持续活动的断层引发强烈的热流体活动,响应于浅层出现了本应发生在深部的有机-无机相互作用、高温流体包裹体、无机气的大量富集。滨海断裂港东段由于活动强度在时间和断裂带分带上的差异,热流体对油气成藏条件的影响虽然不是很强烈,但从记录成岩温度的流体包裹体以及油气组分特征看,烃源岩热演化指标以及储层内流体特征及孔隙演化均证实了热流体对油气藏的影响。

## 5 结 论

(1) 热流体活动作用于正常热传导的地温,导致局部地层温度异常,强化烃源岩的热演化程度,扩大有效源岩的分布范围。响应于储层中流体包裹体所记录的温度高于对应深度段最大埋深所经历的温度,以及储层中黏土矿物和矿物的热蚀变。

(2) 热流体的活动对物质场的改造体现在无机 CO<sub>2</sub> 对原有油气藏的油气组分的重新分布,深部高矿化度的卤水影响了浅层储层中的流体成分,通过流体-岩石相互作用导致岩石及流体中的微量元素的交换。热流体作用于储层形成多个次生孔隙带及埋深 5 000 m 以下仍有物性好的优质储层。

(3) 热流体活动影响了研究区内的油气生-运-聚过程。不仅影响烃源岩的热演化和分布,同时还影响了有利储层的分布深度和层位,改造和调整了油气藏的组分和压力体系。热流体活动的输导体系也是油气藏的输导体系,热流体上涌和发生扩散的区域也是油气聚集成藏的有利区,这些区域是油气勘探活动的有利靶区。

### 参 考 文 献

- [1] Anderson R N. Recovering dynamic Gulf of Mexico reserves and the US energy future[J]. *Oil and Gas Journal*, 1993, 91(17): 85-91.
- [2] Bjørlykke K. Fluid-flow processes and diagenesis in sedimentary basins[A]// Parnell J. *Geofluids: Origin, migration and evolution of fluids in sedimentary basins*[C]. Geological Society Special Publication, 1994, 78: 127-140.
- [3] 李明诚. 地壳中的热流体活动与油气运移[J]. *地质前缘*, 1995, 2(3/4): 155-162.
- Li Mingcheng. Hot fluid activity in crust and hydrocarbon migration[J]. *Earth Science Frontiers*, 1995, 2(3/4): 155-162.
- [4] 解习农, 李思田, 胡祥云, 等. 莺歌海盆地底辟带热流体输导系统及其成因机制[J]. *中国科学 D 辑*, 1999, 29(3): 247-256.
- Xie Xinong, Li Shitian, Hu Xiangyun, et al. Conduit system and formation mechanism of heat fluids in diapiric belt of Yinggehai basin, China[J]. *Science in China Series D*, 1999, 42(6): 561-571.
- [5] 解习农, 姜涛, 王华, 等. 莺歌海盆地底辟带热流体突破的地层水化学证据[J]. *岩石学报*, 2006, 22(8): 2243-2248.
- Xie Xinong, Jiang Tao, Wang Hua, et al. Expulsion of overpressured fluid revealed by geochemistry of formation water in the diapiric structures of Yinggehai basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(8): 2243-2248.
- [6] 郝芳, 孙永传, 李思田, 等. 活动热流体对有机质热演化和油气生成作用的强化[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 1996, 21(1): 68-72.
- Hao Fang, Sun Yongchuan, Li Shitian, et al. Enhancement of organic maturation and petroleum generation by hydrothermal fluids[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 1996, 21(1): 68-72.
- [7] 殷秀兰, 马寅生, 冯向阳, 等. 莺歌海盆地东方 1-1 底辟区深部热流体穿层的热应力及其效应[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2005, 30(1): 83-88.
- Yin Xiulan, Ma Yinsheng, Feng Xiangyang, et al. Thermal stresses and their effects during the deep hot fluids penetrating upward in DF1-1 diapiric area, Yinggehai basin[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2005, 30(1): 83-88.
- [8] 刘建章, 刘伟, 王存武. 沉积盆地活动热流体类型及其石油地质意义[J]. *海洋石油*, 2004, 24(3): 8-13.
- Liu Jianzhang, Liu Wei, Wang Cunwu. Hydrothermal fluids flow types in sedimentary basins and its significance of petroleum geology[J]. *Offshore Oil*, 2004, 24(3): 8-13.
- [9] 孙永传, 陈红汉, 李蕙生. 莺—琼盆地 YA13-1 气田热流体活动与有机-无机成岩响应[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 1995, 20(3): 276-282.
- Sun Yongchuan, Chen Honghan, Li Huisheng, et al. Thermal fluid flows and their organic and inorganic diagenetic responses in Ya13-1 gas field of Yinggehai-Qiongdongnan basins South China Sea[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 1995, 20(3): 276-282.
- [10] 龚再生, 李思田, 谢泰俊, 等. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 222-256.



- Gong Zaisheng, Li Sitian, Xie Taijun, et al. Continental margin basin analysis and hydrocarbon accumulation of the northern South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 1997; 222-256.
- [11] 叶加仁, 杨香华. 沉积盆地热流体活动及其成藏动力学意义[J]. 沉积学报, 2001, 19(2): 214-218.  
Ye Jiaren, Yang Xianghua. Thermal fluid flow in sedimentary basins and its significance to pool-forming dynamics[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(2): 214-218.
- [12] 于志超, 刘立, 孙晓明, 等. 歧口凹陷古近纪热流体活动的证据及其对储层物性的影响[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(增刊3): 1-13.  
Yu Zhichao, Liu Li, Sun Xiaoming, et al. Evidence of Paleogene thermal fluid activities and their impact on porosity-permeability of reservoir in Qikou sag[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42(supplement 3): 1-13.
- [13] 孟庆任, 王战, 王翔, 等. 新生代黄骅坳陷构造伸展、沉积作用和岩浆活动[J]. 地质论评, 1993, 39(6): 535-547.  
Meng Qingren, Wang Zhan, Wang Xiang, et al. Tectonic extension, sedimentation and magmatism of the Cenozoic Huanghua depression[J]. Geological Review, 1993, 39(6): 535-547.
- [14] 池英柳, 赵文智. 渤海湾盆地新生代走滑构造与油气聚集[J]. 石油学报, 2000, 21(2): 14-20.  
Chi Yinliu, Zhao Wenzhi. Strike-slip deformation during the Cenozoic and its influence on hydrocarbon accumulation in the Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(2): 14-20.
- [15] 王光奇, 漆家福, 岳云福. 歧口凹陷及周缘新生代构造的成因和演化[J]. 地质科学, 2003, 38(2): 230-240.  
Wang Guangqi, Qi Jiafu, Yue Yunfu. Formation and evolution of the Cenozoic tectonics within and surrounding the Qikou sag[J]. Chinese Journal of Geology, 2003, 38(2): 230-240.
- [16] 樊敬亮, 黄志全, 樊卫花. 歧口凹陷新生代构造演化与油气[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2004, 34(4): 536-541.  
Fan Jingliang, Huang Zhiquan, Fan Weihua. Cenozoic tectonic evolution of Qikou sag and its relations to hydrocarbon traps in Bohai Bay basin of East China[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2004, 34(4): 536-541.
- [17] 周立宏, 卢异, 肖敦清, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷盆地结构构造及演化[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(3): 373-382.  
Zhou Lihong, Lu Yi, Xiao Dunqing, et al. Basinal texture structure of Qikou sag in Bohai Bay basin and its evolution[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(3): 373-382.
- [18] 李洪香, 李会慎, 王永凯, 等. 歧北斜坡沙河街组油气成藏期次分析[J]. 录井工程, 2012, 23(2): 49-53.  
Li Hongxiang, Li Huishen, Wang Yongkai, et al. Analysis of oil and gas accumulation period in Qibei slope Shahejie Group[J]. Mud Logging Engineering, 2012, 23(2): 49-53.
- [19] 王辉, 卢异, 张志攀, 等. 歧口凹陷新生代伸展断裂展布及演化特征[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(6): 1009-1014.  
Wang Hui, Lu Yi, Zhang Zhipan, et al. Expanding fracture distribution of Qikou sag in Cenozoic and its evolution[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(6): 1009-1014.
- [20] 王书香, 何咏梅, 刘庆新, 等. 歧口凹陷深层天然气勘探潜力[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(6): 49-52.  
Wang Shuxiang, He Yongmei, Liu Qingxing, et al. Exploration potential of deep natural gas of Qikou Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2009, 16(6): 49-52.
- [21] 牛嘉玉, 李峰. 渤海湾盆地滩海地区油气富集规律与油气勘探[J]. 石油学报, 2000, 21(2): 9-13.  
Niu Jiayu, Li Feng. Inshore oil-gas accumulation and exploration in Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(2): 9-13.
- [22] 吴元燕, 付建林, 周建生, 等. 歧口凹陷含油气系统及其评价[J]. 石油学报, 2000, 21(6): 18-22.  
Wu Yuanyan, Fu Jianlin, Zhou Jiansheng, et al. Evaluation of hydrocarbon system in Qikou sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(6): 18-22.
- [23] 张杰, 邱楠生, 王昕, 等. 黄骅坳陷歧口凹陷热史和油气成藏史[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(4): 505-511.  
Zhang Jie, Qiu Nansheng, Wang Xi, et al. Thermal evolution and reservoiring history in Qikou sag, Huanghua depression[J]. Oil and Gas Geology, 2005, 26(4): 505-511.
- [24] 龚育龄, 王良书, 刘绍文, 等. 济阳坳陷大地热流分布特征[J]. 中国科学 D 辑, 2003, 33(4): 384-391.  
Gong Yuling, Wang Liangshu, Liu Shaowen, et al. Distribution characteristics of terrestrial heat flow density in Jiyang depression of Shengli Oilfield, East China[J]. Science in China Series D, 2004, 47(9): 804-812.
- [25] 刘宝珺, 李伟, 付建奎, 等. 吐哈盆地台北凹陷粘土矿物纵向异常演化与成因分析[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2002, 27(5): 504-508.  
Liu Baojun, Li Wei, Fu Jiankui, et al. Genesis of abnormal evolution of clay minerals at different diagenetic stages in Taibei depression of Tuha basin[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(5): 504-508.
- [26] 徐同台, 王行信, 张有瑜, 等. 中国含油气盆地粘土矿物[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 160-229.  
Xu Tongtai, Wang Xingxin, Zhang Youyu, et al. The clay minerals of China's petroliferous basins[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 160-229.
- [27] 朱占平, 刘立, 马瑞, 等. 鸡西盆地张新地区浅成侵入体对砂岩储层粘土矿物的影响[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2010, 40(5): 1027-1034.  
Zhu Zhanping, Liu Li, Ma Rui, et al. The effects of hypabyssal intrusive to clay mineral of sandstone reservoir in Zhangxin area in Jixi Basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition



- tion, 2010, 40(5): 1027-1034.
- [28] 周立宏, 韩国猛, 牟智全, 等. 箕状断陷缓坡带油气成藏模式——以歧北斜坡为例[J]. 石油地质与工程, 2013, 27(1): 27-31.  
Zhou Lihong, Han Guomeng, Mou Zhiquan, et al. Research on hydrocarbon accumulation models of gentle slope belt of half graben: a case study of Qibei slope belt[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2013, 27(1): 27-31.
- [29] 戴金星, 宋岩, 戴春森, 等. 中国东部无机成因气及其气藏形成条件[M]. 北京: 科学出版社, 1995.  
Dai Jinxing, Song Yan, Dai Chunsen, et al. The formation of abiogenic gas and gas pools in eastern China[M]. Beijing: Science Press, 1995.
- [30] 戴金星, 胡国艺, 倪云燕, 等. 中国东部天然气分布特征[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(4): 471-487.  
Dai Jinxing, Hu Guoyi, Ni Yunyan, et al. Distribution characteristics of natural gas in eastern China[J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(4): 471-487.
- [31] 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 Jinxin, Shi Xin, Wei Yanzhao. Summary of the abiogenic origin theory and the abiogenic gas pools(fields)[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(6): 5-10.
- [32] 戴春森, 宋岩, 杨池银, 黄骅坳陷天然气中多成因二氧化碳的判识及其混合模型[J]. 石油勘探与开发, 1994, 21(4): 23-29.  
Dai Chunsen, Song Yan, Yang Chiyang. A mixed model for poly-original carbon dioxide of natural gas in Huanghua depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 1994, 21(4): 23-29.
- [33] 杨池银. 黄骅坳陷二氧化碳成因研究[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(1): 7-11.  
Yang Chiyang. Study on the genesis of CO<sub>2</sub> in Huanghua depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(1): 7-11.
- [34] 陈恭洋. 潜江凹陷南部地层水化学特征与油气成藏的关系[J]. 江汉石油学院学报, 2003, 25(3): 15-17.  
Chen Gongyang. Relationships between formation water chemical characteristics and hydrocarbon generation in the south of Qianjiang depression[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2003, 25(3): 15-17.
- [35] 蒲秀刚, 周立宏, 王文革, 等. 黄骅坳陷歧口凹陷斜坡区中深层碎屑岩储集层特征[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 36-48.  
Pu Xiugang, Zhou Lihong, Wang Wenge, et al. Medium-deep clastic reservoirs in the slope area of Qikou sag, Huanghua depression, Bohai Bay basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 36-48.
- [36] 曾溅辉. 东营凹陷热流体活动及其对水-岩相互作用的影响[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2000, 25(2): 133-142.  
Zeng Jianhui. Thermal fluid activities and their effects on water-rock interaction in Dongying sag[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2000, 25(2): 133-142.
- [37] 张义纲. 天然气的生成聚集和保存[M]. 南京: 海河大学出版社, 1991: 141-148.  
Zhang Yigang. Natural gas generation, accumulation and preservation[M]. Nanjing: Haihe University Press, 1991: 141-148.

(收稿日期 2013-11-24 改回日期 2014-03-17 责任编辑 张怡)

版权所有