

# 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

殷秀兰<sup>1</sup>, 马寅生<sup>2</sup>, 冯向阳<sup>3</sup>, 李思田<sup>4</sup>

1. 中国地质环境监测院, 北京 100081

2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

3. 中国地质博物馆, 北京 100034

4. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

**摘要:** 东方1-1底辟区的热流体活动相当强烈和频繁, 深部热流体的穿层上涌产生热应力造成了局部的应力场状况的变化, 形成了特征性的构造和断裂系统, 水力破裂、热流体拱张形成褶皱和局部破裂等, 这些褶皱和断裂共同构成了底辟带热流体活动中垂向导的主要通道之一。由于热流体穿层活动不仅携带了大量的烃类气和CO<sub>2</sub>等非烃气, 而且具极强的热力作用, 引起了强烈的热异常, 导致所穿入的浅部地层中的热力学参数, 如粘土矿物的演化、储层中流体包裹体以及岩石所含有机质的镜质体反射率等发生一系列的异常变化, 致使底辟作用前后底辟体内部及其围岩的特征具有非常显著的差别。本次研究对热流体穿层所引起热应力效应和温度异常采用Field模型进行了定量动力学模拟, 结果显示应力场和温度场的分布随着时间不断向上迁移, 使各小断裂和裂隙连通形成流体的良好的垂向导, 在热流体活动的通道附近热应力的影响十分明显, 致使局部应力急剧增高。

**关键词:** 东方1-1; 深部热流体; 穿层; 热应力; 效应。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2005)01-0083-06

收稿日期: 2004-06-22

## Thermal Stresses and Their Effects during the Deep Hot Fluids Penetrating upward in DF 1-1 Diapiric Area, Yinggehai Basin

YIN Xiu-lan<sup>1</sup>, MA Yin-sheng<sup>2</sup>, FENG Xiang-yang<sup>3</sup>, LI Si-tian<sup>4</sup>

1. *China Institute of Geo-environmental Monitoring, Beijing 100081, China*

2. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China*

3. *Geological Museum of China, Beijing 100034, China*

4. *Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*

**Abstract:** The hot fluids are intensive and frequent in the DF1-1 diapiric area, Yinggehai basin, South China Sea. Thermal fluids penetrating the strata from the deep belt generated thermal stress, which resulted in changes to the local stress field. Moving thermal fluids are capable of transporting a large amount of heat from the deep part of the basin, resulting in thermal anomalies, which heat and expand adjacent sediments to form local thermal stress. Thermal stresses controlled the stress patterns and direction of overpressure fluid migration in some locations. The structural stress associated with thermal stress induced the fluid migration system including fractures, faults and sand folds. On the other hand, because the fluids have had thermal energy and hydrocarbon or CO<sub>2</sub> when penetrating strata from the deep, the obvious temperature differentia caused abnormal phenomena in a series of geochemical parameters, including transferring from smectite to illite, vitrinite reflectance rate, the temperature of fluid inclusions etc. All those processes mean that the characteristics of the diapiric body and its surrounding rock are extremely different before diapirism and after diapirism. This research also demonstrates and analyzes

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 40372102; 40102102).

作者简介: 殷秀兰(1968—), 女, 副研究员, 主要研究方向为盆地流体与构造. E-mail: yinxl@mail.cigem.gov.cn

the evolutional process of the thermal stress field and temperature field by comparing a quantitative dynamic simulation with field analysis. The results show that stress fields and temperature fields moved upwards over time. The thermal stress field also promoted the episodic opening of faults, and accelerated the hydrocarbon-bearing fluid flow upwards. The extent of the effect of thermal fluids depends on the proportion between thermal stress and tectonic stress.

**Key words:** DF1-1 diapir; deep hot fluid; strata penetration; thermal stress; effect.

盆地中的流体,尤其是来源于深部的热流体,作为热和质量传输的有效载体(Bjorlykke, 1994),在向盆地浅部穿层运移的过程中对整个盆地的动力系统 & 热状态都起到了积极的控制作用(Nordgard *et al.*, 2004; Makhous and Galushkin, 2003; Cosgrove, 2001),而且油气本身就是一种特殊的热流体,所以对沉积盆地热流体的活动与作用进行研究是揭示盆地内部能量场演化的基础(Collett, 2002; Lawrence and Cornford, 1995; 李思田, 1992),对于盆地的油气勘探有重要的指导意义。

莺歌海盆地中央底辟带是热流体活动最为强烈的地区(张敏强, 2000; 董伟良和黄保家, 1999),而东方 1-1 底辟区又是其最典型构造之一,位于莺歌海盆地中央底辟带北端,是一个被南北向断裂切割的短轴背斜构造(图 1)。迄今为止,已有探井 9 口,并已证实具有丰富的天然气资源,为一大型气田。在 DF1-1 底辟区的浅层所发现的与底辟有关的含气构造中,天然气的运聚、分布与底辟区的断裂系统和热流体的活动有着密切的联系,热流体的活动不仅为油气的运聚提供了驱动力,而且其产生的断裂系统为油气的运移提供了输导路径。

## 1 东方 1-1 底辟体的发育特征

DF1-1 底辟在莺歌海盆地中属弱能量型,上隆幅度小,呈低缓波状。深层构造幅度明显大于浅层,地层顶薄翼厚,围岩具有东陡西缓的特征。热流体活动时,在 DF1-1 上覆负载层中产生断裂、破碎带和垂向裂隙。当岩层或裂隙带中充注了流体和天然气时,在地震剖面上造成反射模糊带(图 1c),这是由于受气层低速异常和强反射屏蔽的影响,使反射波信噪比频率大幅度降低。通过特殊的地球物理处理技术,在 3 000 m 左右的深度,地层模糊带的影响可被消除,推测主要是由于流体(主要是天然气)的充注所致,而在 5 000~6 000 m 以下的深部,反射异常体内部变得杂乱,推断有以泥为主的塑性很强的流体存在,由此可以判定 DF1-1 底辟是一个中浅部存在众多裂隙的泥-流体底辟(张启明等, 1996)。

底辟体的主要物质来自中中新世以来的泥质岩沉积。其中  $T_{51}-T_{52}$  (三亚组中部)、 $T_{41}-T_{50}$  (梅山组下部)、 $T_{27}-T_{30}$  (莺歌海组下部)主要为浅海一半深海及陆架斜坡沉积,均代表不同时期最大海侵期。

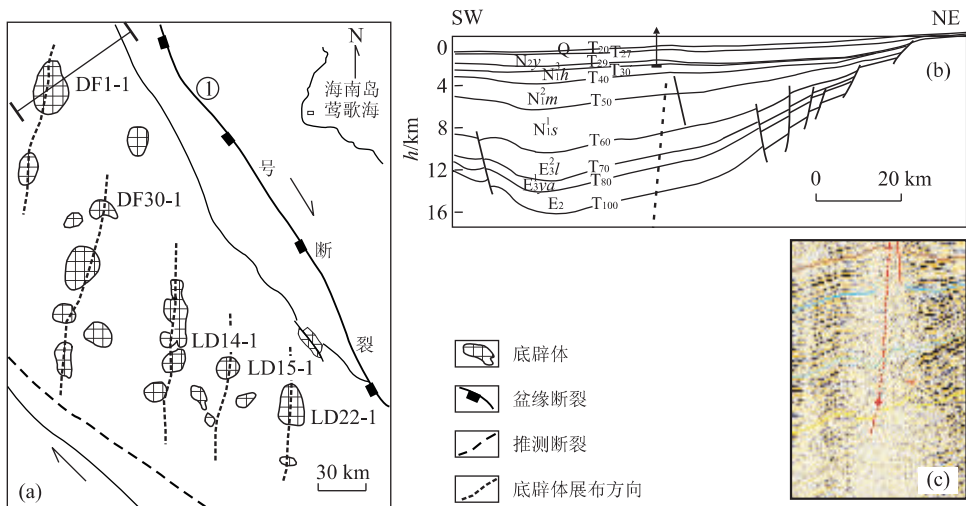


图 1 莺歌海盆地底辟体的分布及 DF1-1 底辟体特征

Fig. 1 Distribution of the diapirs in Yinggehai basin and characteristics of DF1-1 diapir

a. 莺歌海底辟体的分布; b. DF1-1 底辟剖面; c. 底辟体的地震模糊带

DF1-1区由于热流体活动的应力集中在构造中心部位,而且其活动具有幕式特征,晚期形成的断裂叠加并改造了早期断裂,因而形成了断裂复杂带。断裂主要集中于底辟体的上部及翼部,随着远离底辟体,断裂逐渐减少,其内断裂带基本上呈南北向展布(图1a,1b)。

## 2 底辟区热流体活动的样式及期次

在DF1-1底辟区,热流体由深部超压带通过不同输导系统向浅层和地表运移,在盆地的浅层、中层和中深层等不同部位以及海底具有各自不同的响应,通过地震反射带积分剖面和旁侧声纳扫描资料清晰可见,如气苗、麻坑和气囊等。据研究,该区平均地温梯度为 $4.56\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ (董伟良和黄保家,1999),明显高于世界各沉积盆地 $3.0\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 的平均地温梯度,属高地温区,区内热流值可达 $87.5\text{ mW}/\text{m}^2$ ,与我国平均值 $61.5\text{ mW}/\text{m}^2$ 相比,属高热流区,说明研究区热流体是十分活跃的。

### 2.1 热流体的活动样式

热流体活动的方式有2种,即热传导和热随流,其中热随流又可分为环型对流和单向随流(解习农等,1999)。在DF1-1底辟区的热流体活动主要是由于压力差的存在造成的,属于单向强迫性随流,其活动形式取决于输导通道的差异。当输导通道以渗透性较好的砂层、不整合界面为主时,热流体主要呈侧向运移,所以称侧向随流;当输导通道以垂向断裂或裂缝输导网络为主时,热流体沿垂向输导网络运移,称垂向随流。以上这2种输导通道是输导体系中的2个极端类型,实际的输导通道由这2种连通和以任一种方式为主而介于其间的各种状态组成,所以热流体的活动方式是侧向或垂向交替的复合热流体活动样式(图2)。

### 2.2 热流体活动期次

郝芳等(2001)、黄春菊等(2002)根据流体包裹体的类型、测温和成分分析等研究提出莺歌海盆地中至少存在三期与深部热流体注入有关的流体包裹体,笔者对DF1-1底辟区流体活动较强烈的井段(DF1-1-3,DF1-1-4)进行了系统取样,并对流体包裹体进行了系统的测温,结果见表1。从中可以看到DF1-1底辟区中包裹体均一温度可归纳出3组,分别为 $120\sim 160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $170\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $220\sim 280\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,流体包裹体的这3个发育期次基本上与流体活动期

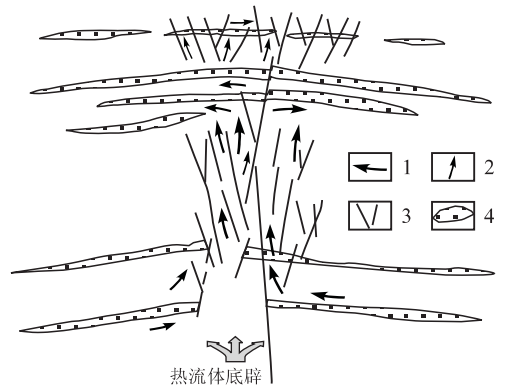


图2 DF1-1底辟区热流体的活动样式

Fig. 2 Pattern of the hot fluid activities in DF1-1 diapir area

1. 侧向运移流体; 2. 垂向运移流体; 3. 断裂及裂隙; 4. 储层砂体

表1 DF1-1流体包裹体温度测试结果

Table 1 Ranges of homogenization temperatures of the fluid inclusions in DF1-1 diapir

井号	井段/m	均一温度/ $^{\circ}\text{C}$
DF114-7	1 235. 67	120~124, 130~180
DF114-9*	1 278. 28	108~118, 136~178
DF114-12*	1 289. 40	113~122, 135~169
DF114-13	1 312. 00	101~122, 143~149
DF114-15*	1 321. 56	92~94, 130~132
DF113-3*	1 267. 00	147~162, 210~230, 266
DF113-11	1 336. 00	126~136, 142~150, 179~196, 230
DF113-12	1 387. 91	130~150, 193~215, 262~280
DF113-17	1 387. 91~ 1 389. 91	115~120, 132~138, 152~161

\* 据核工业北京地质研究员分析测试中心;其他据中国地质大学(武汉)流体包裹体实验室。

次相对应。在地震剖面中也可看到热流体的多期次特征,如3489剖面中 $T_{50}$ 、 $T_{41}$ 、 $T_{28}$ 、 $T_{18}$ 各界面之上都出现双向上超,且上覆地层“顶薄翼厚”,代表流体的强烈活动期。与盆地形成演化过程相比较可以发现,第三期(上新世后)的热流体活动最强烈,包裹体均一温度较高,且与浅层气藏大量天然气形成及运聚时间相吻合,这表明晚期强烈的热流体上侵活动是控制本区天然气大量形成及运聚的主导因素。

## 3 深部热流体穿层的热效应

沉积盆地内热流体活动过程实际上是热流体聚集与散失的动平衡过程,其直接表现就是温度和压力以及化学指标的改变(Larue and Legarre, 2004)。在DF1-1底辟区超压体系的幕式突破造成的热流体活动相当强烈和频繁。热流体穿层活动的最终结果不仅

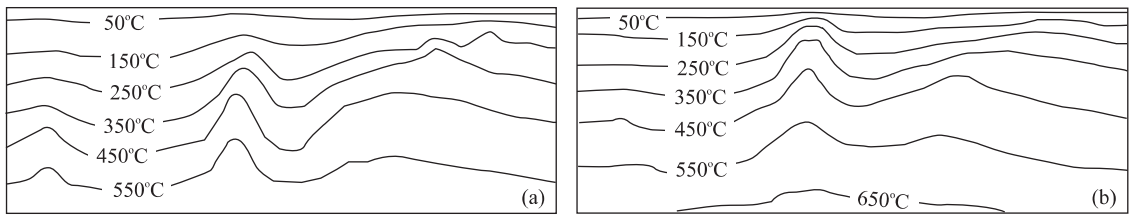


图 3 DF1-1 底辟区 913489 剖面温度场模拟结果

Fig. 3 Distribution of the temperature field for the digital simulation of 913489 profile in DF1-1 diapir area

a. 底辟作用之前的温度场模拟结果; b. 底辟作用之后的温度场模拟结果

携带了大量的烃类气和  $\text{CO}_2$  等非烃气, 而且具极强的热力作用, 引起了强烈的热异常, 导致所穿入的浅部砂泥岩中粘土矿物演化、储层中流体包裹体以及岩石所含有机质的镜质体反射率等对热作用敏感的参数发生一系列的异常变化, 并产生一些明显区别于无热流体穿层活动区域的独特地质现象. 这不仅使原岩生烃作用明显强化, 生烃门限深度降低 250~300 m, 而且亦为研究热流体穿层活动提供了证据.

### 3.1 流体包裹体均一温度分布特征

DF1-1 底辟区浅层气藏储层中流体包裹体均一温度所表征的地史期古地温均高于现今储层温度. 浅层气藏 1 287~2 058 m 储层流体包裹体均一温度主值为 120~200  $^{\circ}\text{C}$ , 而相应深度的现今储层温度主要为 70~90  $^{\circ}\text{C}$ , 远远低于其古地温, 两者的差异表明该区地史期曾经历了强烈的热流体上侵活动, 最终导致古流体温度剧增且与现今储层温度相差很大.

### 3.2 化学指标的异常变化

泥岩中有机质的镜质体反射率是确定有机质热演化程度的重要参数, 由于底辟区强烈的热流体穿层活动导致了其浅层局部生烃岩超前成熟, 正常热演化的成熟生烃门限深度偏浅, 提前进入了成熟演化阶段(黄保家等, 2002).

粘土矿物演化对热作用相当敏感. 底辟区由于受热流体穿层活动的影响, 其粘土矿物演化在浅部地层中急剧增高(解习农等, 1999).

### 3.3 古温度场的展布

本次研究根据 DF1-1 底辟区各井位的温度资料、流体包裹体的测温、古地温研究等的结果, 采用边界载荷试凑法, 同时考虑区内的热对流效应, 对 DF1-1 底辟区温度场进行模拟. 模拟的温度场分布特征见图 3. 在诱导断裂内及其附近, 温度明显增高, 这刚好证明了本区流体与温度的耦合关系: 由于断裂的开启有利于深部热流体的活动, 热流体在活

动过程中将深部的热向上携带, 从而造成断裂及其附近的高温现象(图 3b)(殷秀兰等, 2003), 与底辟作用之前(图 3a)相比具有明显的差别.

## 4 深部热流体穿层的构造效应

热流体的穿层上涌携带了大量的热, 可以造成局部的应力场状况的变化, 并产生热应力(图 4), 对断裂系统的形成及其输导能力、流体运移的势场均有重要的影响(Gibson and Bentham, 2003), DF1-1 底辟区断裂系统和构造样式主要是由于热流体穿层所引发的泥、流体等物质流向压力释放区的涌动造成的. 在 DF1-1 底辟顶部的背斜圈闭中都有很多断裂, 受先存断裂活动的控制, 部分穿过上部各层延伸到海底, 从而构成底辟带超压流体活动中垂向输导的主要通道之一(图 2).

### 4.1 水力破裂

在低渗透岩石中, 当孔隙流体压力达到静岩压力的 80% 左右即可发生水力破裂. 在 DF1-1 底辟中超压囊顶界面附近流体压力与岩石破裂压力最为接近, 即水力破裂最易在此部位产生. 单个的水力破裂是小型的, 但成带分布, 形成密集的网络, 在高压流体作用下其分布面积不断扩大. 在流体压力集中部位, 小型破裂联结成贯穿性断裂(Sibson, 2003). 当水力破裂带充满天然气时在地震响应上呈层状模糊带, 并可看到大量弥散状小型破裂(图 5a).

### 4.2 热流体拱张形成的破裂

当大规模热流体向上突破时, 高温超压背景下高塑性的岩石在非均衡状态下会发生流动, 两侧岩石蠕变和流动的方向均向底辟部位, 从而形成向底辟体逆冲的一系列微小的逆断层群(图 5a). 如果顶部封闭性好, 应力不能释放, 反而会得以集中, 导致上覆地层形成拱张型断裂或裂缝(图 5b).



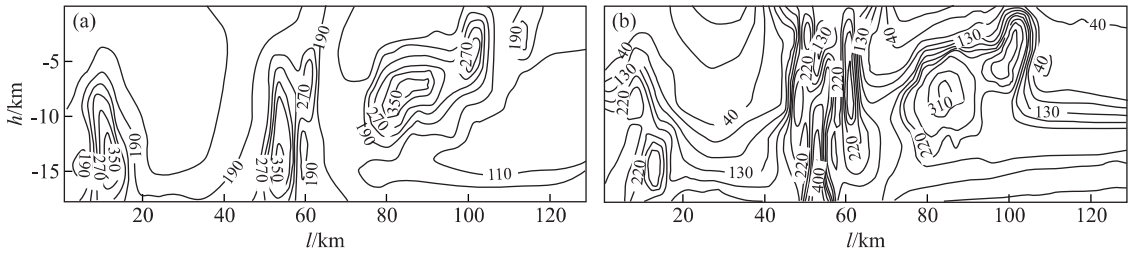


图 4 DF1-1 底辟区热流体穿层所造成的热应力(单位:MPa)

Fig. 4 Simulation result of thermal stress in DF1-1 diapiric area

a. 底辟作用前的热应力模拟结果; b. 底辟作用后的热应力模拟结果

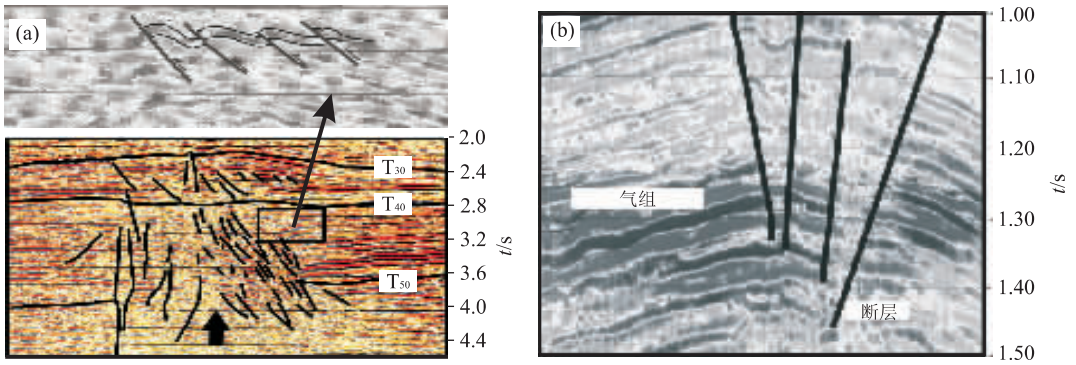


图 5 莺歌海盆地 DF1-1 底辟构造中 3489 剖面的破裂现象(a)和底辟顶部断裂的剖面特征(b)(据南海西部公司)

Fig. 5 Fractures of profile 3489 (a) and the top faults (b) of DF1-1 diapir in Yinggehai basin

### 4.3 褶皱构造

热流体大规模地向上穿层的过程中,使其顶部的岩石承受巨大的向上应力,发生变形(Gibson and Bentham, 2003),从而形成大的拱张背斜(图 5b)。

## 5 结论

在 DF1-1 底辟区超压体系的幕式突破造成的热流体活动相当强烈和频繁. 热流体穿层活动的最终结果,不仅携带了大量的烃类气和 CO<sub>2</sub> 等非烃气,而且具极强的热力作用,引起了强烈的热异常,导致所穿入的浅部地层中粘土矿物演化、储层中流体包裹体以及岩石所含有机质的镜质体反射率等参数发生一系列异常变化,致使运移通道附近古温度场产生波动. 同时,热流体的穿层上涌又造成了局部的应力场状况的变化,并产生热应力,对褶皱和断裂系统的形成及其输导能力有重要的影响.

油气作为热流体的组成部分,伴随热流体向上穿层而大规模运移,遇到储层或高渗层时则侧向运移,如果有合适的圈闭,则聚集成藏(高波等,2001). 因此,热流体活动不仅改变了盆地内温度场、压力场

和成岩场,更重要的是对盆地内油气聚集起着关键的控制作用.

### References

Bjorlykke, K. , 1994. Fluid-flow processes and diagenesis in sedimentary basins. In: Parnell, J. , ed. , *Geofluids: Origin, migration and evolution of fluids in sedimentary basins. Geological Society Special Publication* , 78: 127 – 140.

Collett, T. S. , 2002. Energy resource potential of natural gas hydrates. *AAPG Bulletin* , 86(11): 1971 – 1992.

Cosgrove, J. W. , 2001. Hydraulic fracturing during the formation and deformation of a basin: A factor in the dewatering of low-permeability sediments. *AAPG Bulletin* , 85(4): 737 – 748.

Dong, W. L. , Huang, B. J. , 1999. Heterogeneity of natural gases and the episodic charging process; A case study for Dongfang 1-1 gas field, Yinggehai basin. *Petroleum Exploration and Development* , 26(15): 15 – 18 (in Chinese with English abstract).

Gao, B. , Tao, M. X. , Wang, W. C. , 2001. Influences of deeply sourced thermal fluid on the formation of hydrocarbon reservoirs. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and*

- Geochemistry, 20(1): 30—34 (in Chinese with English abstract).
- Gibson, R. G., Bentham, P. A., 2003. Use of fault-seal analysis in understanding petroleum migration in a complexly faulted anticlinal trap, Columbus basin, offshore Trinidad. *AAPG Bulletin*, 87(3): 465—478.
- Hao, F., Li, S. T., Gong, Z. S., et al., 2001. The mechanism of diapirs developing and episodic expulsing in Yinggehai basin. *Science in China (Series D)*, 31(6): 471—476 (in Chinese).
- Huang, B. J., Xiao, X. M., Dong, W. L., 2002. Source rocks and generation & evolution model of natural gas in Yinggehai basin. *Natural Gas Industry*, 22(1): 26—30 (in Chinese with English abstract).
- Huang, C. J., Chen, K. Y., Li, S. T., 2002. Periodicities of diapiric rise in the Yinggehai basin. *Petroleum Exploration and Development*, 29(4): 44—46 (in Chinese with English abstract).
- Larue, D. K., Legarre, H., 2004. Flow units, conductivity, and reservoir characterization in a wave-dominated deltaic reservoir: Meren reservoir, Nigeria. *AAPG Bulletin*, 88(3): 303—324.
- Lawrence, S. R., Cornford, C., 1995. Basin geofluids. *Basin Research*, 57: 1—7.
- Li, S. T., 1992. To get the giant achievements in oil/gas field—The synopsis of the history in researching active hot fluid. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 6(6): 69—70 (in Chinese with English abstract).
- Makhous, M., Galushkin, Y. I., 2003. Burial history and thermal evolution of the northern and eastern Saharan basins. *AAPG Bulletin*, 87(10): 1623—1652.
- Nordgard, B. H. M., Hermanrud, C., Teige, G. M. G., 2004. Origin of overpressures in shales: Constraints from basin modeling. *AAPG Bulletin*, 88(2): 193—212.
- Sibson, R. H., 2003. Brittle-failure controls on maximum sustainable overpressure in different tectonic regimes. *AAPG Bulletin*, 87(6): 901—908.
- Xie, X. N., Li, S. T., Dong, W. L., et al., 1999. Trace marker of hot fluid flow and their geological implications—A case study of Yinggehai basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 24(2): 183—188 (in Chinese with English abstract).
- Yin, X. L., Li, S. T., Yang, J. H., 2003. Study on the digital simulation of structural stress field and flow field in DF1-1 diapir. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(3): 268—274 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, M. Q., 2000. Migration accumulation characteristics of natural gas in the diapir structure belt of Yinggehai basin. *Journal of University of Petroleum*, 24(4): 39—42 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q. M., Liu, F. N., Yang, J. H., 1996. Overpressure system and oil/gas accumulation. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 10(2): 65—75 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 董伟良, 黄保家, 1999. 东方 1—1 气田天然气组成的不均一性与幕式充注. *石油勘探与开发*, 26(15): 15—18.
- 高波, 陶明信, 王万春, 2001. 深部热流体对油气成藏的影响. *矿物岩石地球化学通报*, 20(1): 30—34.
- 郝芳, 李思田, 龚再升, 等, 2001. 莺歌海盆地底辟发育机理与流体幕式充注. *中国科学(D辑)*, 31(6): 471—476.
- 黄保家, 肖贤明, 董伟良, 2002. 莺歌海盆地烃源岩特征及天然气生成演化模式. *天然气工业*, 22(1): 26—30.
- 黄春菊, 陈开远, 李思田, 2002. 莺歌海盆地泥底辟活动期次分析. *石油勘探与开发*, 29(4): 44—46.
- 李思田, 1992. 为实现油气领域的重大突破——活动热流体的历史研究简介. *中国海上油气(地质)*, 6(6): 69—70.
- 解习农, 李思田, 董伟良, 等, 1999. 热流体活动示踪标志及其地质意义——以莺歌海盆地为例. *地球科学——中国地质大学学报*, 24(2): 183—188.
- 殷秀兰, 李思田, 杨计海, 2003. DF1—1 底辟区构造应力场及渗流场演化的数值模拟研究. *地球科学——中国地质大学学报*, 28(3): 268—274.
- 张敏强, 2000. 莺歌海盆地底辟构造带天然气运聚特征. *石油大学学报*, 24(4): 39—42.
- 张启明, 刘福宁, 杨计海, 1996. 莺歌海盆地超压体系与油气聚集. *中国海上油气(地质)*, 10(2): 65—75.