

# 珠江口盆地白云凹陷中央底辟带的发现及识别

王家豪<sup>1</sup>, 庞雄<sup>2</sup>, 王存武<sup>1</sup>, 何敏<sup>2</sup>, 连世勇<sup>2</sup>

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司技术部, 广东广州 510240

**摘要:** 白云凹陷属珠江口盆地的一个次级构造单元。通过对二维地震剖面上模糊带的分析, 凹陷中心发育北西西向展布、面积约1 000 km<sup>2</sup>的底辟带, 底辟幅度最大可达8 km。高精度磁力资料显示底辟带为一个低磁异常区。底辟构造包括龟背上拱、弱刺穿、气烟囱、底辟断层(或裂缝)、海底麻坑等类型, 主要发源于断陷期深湖相的文昌组(始新统)—恩平组(上始新统—下渐新统), 其次为拗陷期浅海—深海相沉积的珠江组(下中新统)—韩江组(中中新统)的两套巨厚富泥沉积层。白云凹陷具有快速沉降、细粒充填为主、以及新生代的右旋张扭性应力场, 共同造就了凹陷中央底辟带的发育。底辟构造的存在反映了白云凹陷中心曾经蕴育着高温、超压系统, 与之密切伴生的大量亮点指示着沿底辟构造的天然气垂向输导, 构成了古近系油气运移到新近系—第四系的成藏动力系统。

**关键词:** 珠江口盆地; 白云凹陷; 底辟构造。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2006)02-0209-05

收稿日期: 2005-06-13

## Discovery and Recognition of the Central Diapiric Zone in Baiyun Depression, Pearl River Mouth Basin

WANG Jia-hao<sup>1</sup>, PANG Xiong<sup>2</sup>, WANG Cun-wu<sup>1</sup>, HE Min<sup>2</sup>, LIAN Shi-yong<sup>2</sup>

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. CNOOC Ltd. Shenzhen, Guangzhou 510240, China

**Abstract:** The Baiyun depression is a sub-unit of the Pearl River Mouth basin. In the center of this depression, fuzzy zones on 2D seismic profiles and low magnetic anomalies have been analyzed. A diapiric zone has been revealed, with a WNW directional distribution, about 1 000 km<sup>2</sup> planar area and about 8 km most pierced thickness. The diapiric structures display various types such as a turtleback-like arch, weak piercing, gas-chimney, fault (or crack) and seabed pit, originated in two huge mud-rich strata the Wenchang Formation (Eocene) and the Enping Formation (Upper Eocene-Lower Oligocene). There are deep-lake facies in the rift period of the depression; the secondary is the Zhujiang Formation (Lower Miocene) and Hanjiang Formation (Middle Miocene), which have shallow or deep-marine facies in down-warping period. In the depression, factors are favorable for diapirism such as rapid subsidence, fine-grain sediment mainly filling, and dextral tenso-shear stress-field since the Cenozoic. The structures indicate a high temperature-overpressure system ever developed. Closely associated and abundant bright-spots show natural gas has migrated vertically, and a dynamic system has existed for petroleum transported from the Paleogene to the Neogene and Quaternary.

**Key words:** Pearl River Mouth basin; Baiyun depression; diapiric structure.

### 1 简介

底辟构造由地球深部物质上拱或刺穿到浅部产

生(王燮培等, 1990)。其中, 含油气盆地中的流体底辟构造构成了烃源岩垂向幕式排烃和油气幕式成藏的一种特殊类型, 不同于传统的粒间渗透模式。在我

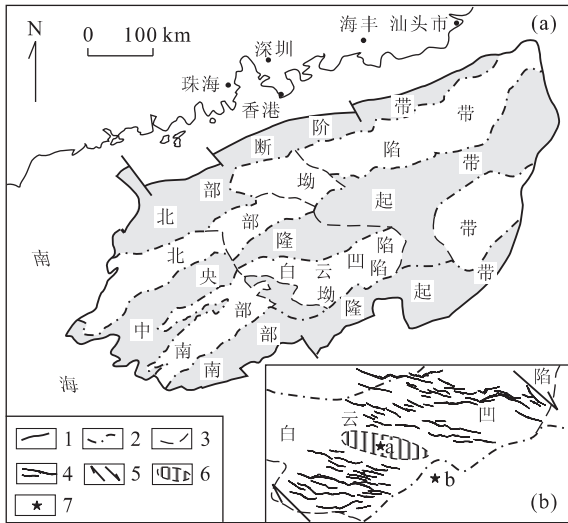


图 1 白云凹陷区域构造位置(a)及其底辟构造主要发育区(b)  
Fig. 1 Tectonic location of the Baiyun depression and its main diapiric structure distribution

1. 珠江口盆地边界; 2. 一级构造单元边界; 3. 二级构造单元边界; 4. 21 Ma 反射层 NWW 向雁行状断裂; 5. 右旋张扭性应力场方向; 6. 底辟构造主要发育区; 7. 图 2a、b 的位置

国近海的莺歌海盆地和渤中坳陷, 都发育有典型的底辟构造, 并表现为泥底辟和流体底辟叠加作用的特点(龚再升, 2002; 张树林等, 1999)。尤其是莺歌海盆地的中央底辟带面积达  $1\ 000\ \text{km}^2$ , 经钻井证实, 沿底辟构造的油气垂向输导、在底辟上拱背斜聚集是该盆地的首要成藏类型(解习农等, 1999; 郝芳等, 2001)。一般地, 快速沉降、细粒沉积物快速充填、高地温梯度以及由此形成的巨厚的泥源层和强超压, 以及张扭性应力场, 是泥—流体底辟构造发育盆地的基本特征(解习农等, 1999; 张敏强, 2000; Cartwright, 1994; Wang and Xie, 1998)。

珠江口盆地是位于南海北部大陆架上的中、新生代盆地, 白云凹陷属其南部坳陷带的一个次级构造单元(图 1a), 面积约  $20\ 000\ \text{km}^2$ 。近年来在该凹陷发现了大量深水扇沉积, 使之成为我国深海油气勘探的重要选区(Pang *et al.*, 2004; 彭大钧等, 2005)。与莺歌海盆地断裂不发育的特征不同, 白云凹陷断裂构造丰富(图 1b), 并与深部烃源岩沟通; 根据凹陷北缘斜坡带及相邻隆起上的钻井温、压测试、泥岩声波随深度变化等研究, 揭示了今地层为正常温、压系统。因此, 过去普遍认为工区不具备底辟构造的形成条件。但本文通过二维地震剖面分析发现, 白云凹陷底辟构造发育, 主要发育在凹陷中心(略偏西南), 局部至今尚在活动, 总体呈北西西向展

布, 面积约  $1\ 000\ \text{km}^2$ (图 1b), 呈现出凹陷边缘的断裂构造和凹陷中央的底辟构造并存的独特面貌。

## 2 白云凹陷底辟构造的识别

白云凹陷底辟构造的认识始于对凹陷中心地震反射模糊带的深入研究。这些模糊带表现为地震反射连续性变差或中断, 内部反射较杂乱、甚至为空白反射, 局部见同相轴上拱或下拉现象(图 2a)。由于深沉降盆地普遍存在地幔上隆和岩浆多期次活动, 白云凹陷周边钻井共揭示了 5 期岩浆活动(陈长民等, 2003), 过去一般认为这些模糊带是岩浆侵入体。

一般地, 岩浆侵入体比围岩含有较多的磁性矿物而表现出高磁异常(王燮培等, 1990)。本次研究根据白云凹陷及周边高精度磁异常平面分布, 并与凹陷南部高磁异常区发育的岩浆侵入体比较看来, 底辟构造(模糊带)发育的凹陷中心为低磁异常区(图 3)。南部岩浆岩体与围岩呈截切关系, 两者之间见强反射界面——由于密度差形成的波阻抗界面(图 2b), 而凹陷中心的模糊带与围岩不存在绝然的界线。

凹陷中心的模糊带主要发源于古—始新统文昌组、恩平组, 即工区的主力巨厚烃源岩——泥源层,

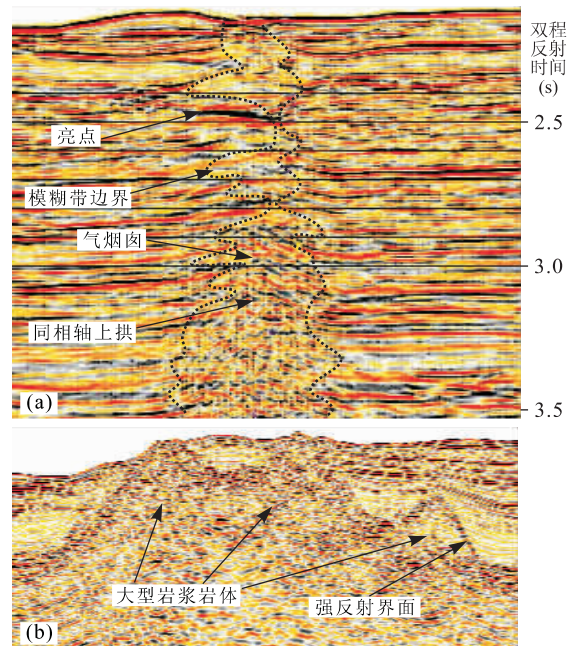


图 2 底辟构造(a)与南部岩浆岩体(b)的地震反射特征比较

Fig. 2 Comparing diapiric structure (a) with southern magmatic buildup (b) on seismic profiles

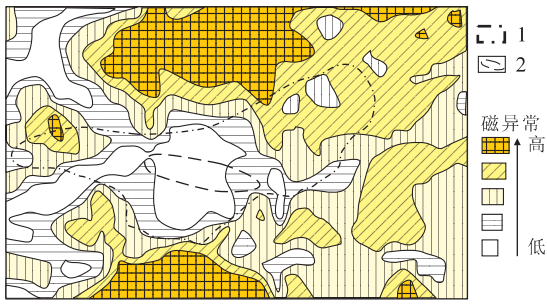


图 3 白云凹陷磁异常分布

Fig. 3 Magnetic anomaly map in Baiyun depression

1. 白云凹陷的范围; 2. 底辟带的位置

其两侧、顶部常见亮点(振幅异常), 研究区北部钻井已揭示亮点与气层存在良好对应关系(Pang *et al.*, 2004). 由此看来, 工区模糊带主要为流体底辟成因.

### 3 白云凹陷底辟构造的样式

研究区底辟现象丰富, 包括龟背上拱、弱刺穿、气烟囱、底辟断层(或裂缝)、海底麻坑等类型, 分别代表了由塑性上拱—弱刺穿—强刺穿—塌陷等不同演化阶段和不同幅度的底辟作用结果(何家雄等, 1994; 董伟良和黄保家, 2000).

(1) 龟背上拱: 龟背上拱是底辟活动初期的产物. 一般认为, 由于受盆地深部异常温、压影响, 厚层泥岩达到一定埋深时将产生密度反转而导致塑性变形, 上覆地层则受力上拱而呈低幅背斜形态. 研究区包括顺层分布的小型龟背上拱群(图 4)和较孤立的大型龟背上拱 2 种类型.

(2) 弱刺穿构造: 刺穿构造是龟背上拱进一步发展导致上覆地层破裂的结果. 龟背上拱背斜核部这一薄弱带是有利的刺穿部位, 在研究区地震剖面上, 可见背斜核部同相轴中断的明显特征(图 5).

(3) 气烟囱: 气烟囱是底辟作用发展至强刺穿—塌陷阶段的结果. 随着刺穿强度(主要表现为刺穿地

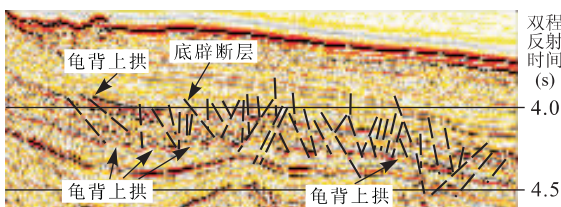


图 4 龟背上拱群与底辟断层

Fig. 4 Turtleback-liking arches and diapiric faults

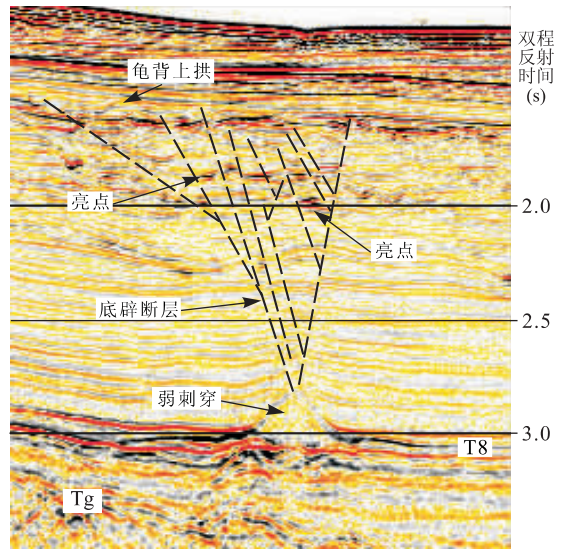


图 5 刺穿构造与底辟断层

Fig. 5 A diapiric structure and diapiric faults

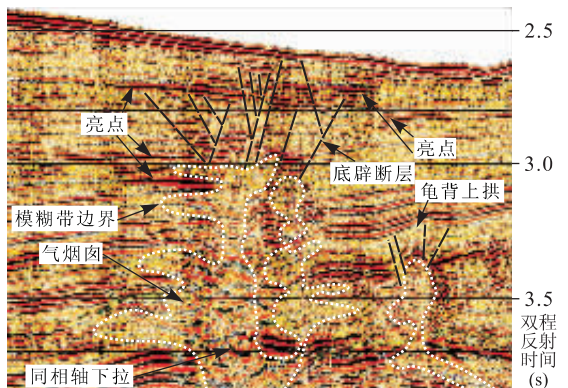


图 6 气烟囱与底辟断层

Fig. 6 Gas-chimneys and diapiric faults

层的厚度)不断增大, 热流体通过该输导通道大量逸散、以及温度的相应降低, 从而形成塌陷构造. 在研究区地震剖面上, 气烟囱呈直立的、上小下大的烟囱状通道(图 2), 局部横向扩张呈囊状、花状(图 6), 形成工区大型的模糊带. 一般认为, 同相轴下拉是热流体特别是天然气充注造成低速异常所致.

(4) 底辟断层和裂缝: 底辟断层或裂缝是异常高压形成的断裂或裂缝系统, 即流体压裂(或称水力破裂). 在研究区, 底辟断层直接位于龟背上拱、刺穿构造、气烟囱构造的上方, 是底辟流体向上分散溢出的通道, 剖面上呈“Y”型、树枝状、似花状等组合形态, 具有产状陡、断距小等特点. 研究区包括 2 种类型: ①顺层发育的底辟断层, 断层数量多、密集、局部呈“Y”型组合(图 3), 解习农等(1999)称这种类型为

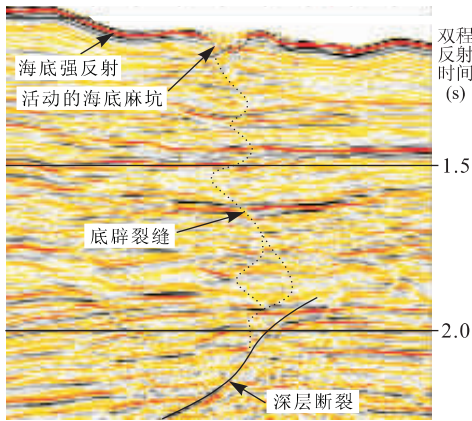


图 7 底辟裂缝和海底麻坑

Fig. 7 Diapiric crack and a seabed-pit

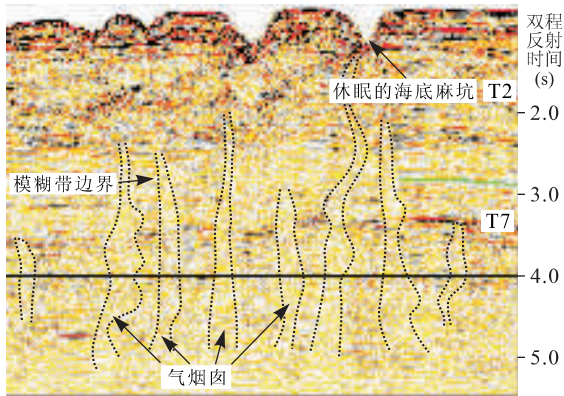


图 8 气烟囱群和休眠的海底麻坑

Fig. 8 A group of gas chimneys and dormant seabed-pits

“层内流体压裂”；②向上生长发育的底辟断层，与较大型的龟背上拱、刺穿或气烟囱构造密切伴生，切穿地层厚度较大，局部呈似花状组合(图 5, 6)。底辟裂缝与断层的差别在于无明显断距，裂缝面隐约可见，呈曲折、断续状与深部断层、模糊带沟通，两侧的亮点或顶部的海底麻坑说明了其作为流体运移通道的历史(图 7)。

(5)海底麻坑：海底麻坑是流体喷溢及流体喷溢后的塌陷造成。根据海底侧向声纳扫描和电火花浅层剖面记录、化探等手段，莺歌海盆地、渤海海域都揭示了海底麻坑的存在(龚再升, 2002; 解习农等, 1999)，伴随的气苗显示流体至今尚在活动。在研究区包括活动和休眠的海底麻坑 2 类，活动的海底麻坑呈漏斗状，表现为海水与海底沉积物形成的强连续反射同相轴被中断(图 7)。休眠的海底麻坑表现为与气烟囱位置对应的陷落深坑(图 8)。

## 4 白云凹陷底辟构造的成因

白云凹陷底辟构造主要发育于凹陷中心，底辟幅度最大可达 8 km。在穿越凹陷中心的南东向地震剖面上，可见成排分布的底辟构造群(图 6, 8)。归纳起来，白云凹陷具备底辟构造发育的诸多条件：(1)面积大、快速沉降和充填。白云凹陷新生界最厚达 11 km(莺歌海盆地新生界最大厚度 17 km)；(2)细粒充填为主，发育成陆相和海相 2 套巨厚的泥源层(Pang *et al.*, 2004)。白云凹陷自古一始新世开始发生裂陷，始新世—渐新世发育了文昌组—恩平组(T8~T<sub>g</sub>, 图 5)广泛的深湖相泥岩沉积，最大厚度超过 5 km，是研究区的主要烃源岩( $R_o = 1.2\% \sim 2.2\%$ )，并成为底辟构造的主要发源层；晚渐新世—早中新世开始，研究区进入拗陷演化阶段，海水从南大规模侵入，结束了研究区陆相盆地的演化历史，也抑制了陆源粗碎屑的供给，除在海平面大幅度下降期发育海底扇之外，全部为浅—深海相细粒沉积。其中，中、下中新统珠江组和韩江组(T2~T7, 图 8)为又一套巨厚的泥源层(最大厚度近 4 km)，与莺歌海盆地泥源层梅山—三亚组发育时间一致(解习农等, 1999)，珠江组已进入生烃门限，成为底辟构造的次要发源层；(3)右旋张扭性构造背景。白云凹陷新生代处于右旋张扭性区域构造作用下，凹陷内派生出一系列雁行状排列的 NWW 向断裂(图 1)。张扭性构造活动能在凹陷中央的沉积盖层内产生构造软弱带，造就了凹陷中央底辟构造的发育，与莺歌海盆地晚第三纪受右旋走滑作用和发育中央底辟带的特点相似(解习农等, 1999)。如果没有张扭性构造作用，形成幅度几千至近万 m 的底辟构造是难以想象的(王燮培等, 1990; Jack and Vendeville, 1994)。

另外，白云凹陷位于被动大陆边缘的陆壳—过渡壳之上，地幔隆升、岩石圈拉张减薄以及多期的热活动对超压的形成和底辟也具有促进作用(Wang and Xie, 1998)。

## 5 意义

综上所述，白云凹陷内十分发育断裂构造和发育完善的底辟构造并存，底辟构造的发现对油气成藏、温压演化分析具有重要意义。

气烟囱、刺穿—底辟断层或气烟囱—底辟断层

组合,形成了幅度达几千 m 至近万 m 的垂向输导系统,为盆地深部侵入岩浆脱气和下第三系烃源岩生产的大量油气输送到上第三系深水扇储层(彭大钧等,2005)、并聚集成藏提供有利条件。根据底辟构造顶部和两侧的亮点显示(图 2,4,7)可初步判断,白云凹陷中央底辟带深水扇系统具备良好勘探远景,可形成与莺歌海盆地类似的油气藏。

底辟构造的存在,甚至直达海底,说明凹陷中心曾经蕴藏着高温、超压系统。而今地层以正常压力为特征,说明白云凹陷随着底辟活动,曾发生过强烈泄压作用。进一步深入研究这种古、今压力系统演化,无疑对该地区油气成藏过程分析将起到重要推动作用。

## References

Cartwright, J. A., 1994. Episodic basin—Wide fluid expulsion from geopressed shale sequences in the North Sea basin. *Geology*, 22: 447—450.

Chen, C. M., Shi, H. S., Xu, S. C., et al., 2003. The condition of hydrocarbon accumulation of Tertiary petroleum system in Pearl River Mouth basin. Science Press, Beijing, 1—121 (in Chinese).

Dong, W. L., Huang, B. J., 2000. Overpressured fluid fracturing, heat fluid flowing and episodic gas migration in the diapir belt, Yinggehai basin. *Petroleum Exploration and Development*, 27(4): 36—40 (in Chinese with English abstract).

Gong, Z. S., 2002. A brief review to some concepts of petroleum exploration in China offshore. *China Of fshore Oil and Gas (Geology)*, 16(2): 73—80 (in Chinese with English abstract).

Hao, F., Li, S. T., Gong, Z. S., 2001. Mechanism of diapirism and episodic fluid injections in the Yinggehai basin. *Science in China (Series D)*, 31(6): 471—476 (in Chinese with English abstract).

He, J. X., Huang, H. Y., Chen, L. C., 1994. The formation and evolution of mud diapir and its relationship with hydrocarbon accumulation mechanism in Yinggehai basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 12(3): 120—129 (in Chinese with English abstract).

Jack, M. P. A., Vendeville, B. C., 1994. Regional extension as a geologic trigger for diapirism. *Geological Society of America Bulletin*, 106(1): 57—73.

Pang, X., Yang, S. K., Zhu, M., et al., 2004. Deep-water fan systems and petroleum resources on the northern slope of the South China Sea. *Acta Geological Sinica*, 78(3): 626—631.

Peng, D. J., Pang, X., Chen, C. M., et al., 2005. From shallow-water shelf to deep-water slope—The research of deep-water fan systems in South China Sea. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(1): 1—11 (in Chinese with English abstract).

Wang, C. Y., Xie, X. N., 1998. Hydro-fracturing and episodic fluid flow in shale-rich basins: A numerical study. *AAPG Bulletin*, 82(11): 1857—1869.

Wang, X. P., Fei, Q., Zhang, J. H., 1990. Tectonic analyses on petroleum basins. China University of Geosciences Press, Wuhan, 85—117 (in Chinese).

Xie, X. N., Li S. T., Hu, X. Y., et al., 1999. Conduit system and formation mechanism of heat fluids in diapiric belt of Yinggehai basin, China. *Science in China (Series D)*, 29(3): 247—256 (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 the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 24(4): 39—42 (in Chinese with English abstract).

Zhang, S. L., Huang, Y. Q., Huang, X. W., 1999. Fluid diapir structure and its geneses. *Geological Science and Technology Information*, 18(2): 19—22 (in Chinese with English abstract).

## 附中中文参考文献

陈长民,施和生,许仕策,等,2003. 珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件. 北京:科学出版社,1—121.

董伟良,黄保家,2000. 莺歌海盆地流体压裂与热流体活动及天然气的幕式运移. 石油勘探与开发, 27(4): 36—40.

龚再升,2002. 对中国近海油气勘探观念变化的回顾. 中国海上油气, 16(2): 73—80.

郝芳,李思田,龚再升,等,2001. 莺歌海盆地底辟发育机制与流体幕式充注. 中国科学(D辑), 31(6): 471—476.

何家雄,黄火尧,陈龙超,1994. 莺歌海盆地泥底辟发育演化与油气运聚机制. 沉积学报, 12(3): 120—129.

彭大钧,庞雄,陈长民,等,2005. 从浅水陆架走向深水陆坡——南海深水扇系统的研究. 沉积学报, 23(1): 1—11.

王燮培,费琪,张家骅,1990. 含油气盆地构造分析. 武汉:中国地质大学出版社,85—117.

解习农,李思田,胡祥云,等,1999. 莺歌海盆地底辟带热流体输导系统及其成因机制. 中国科学(D辑), 29(3): 247—256.

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(自然科学版), 24(4): 39—42.

张树林,黄耀琴,黄雄伟,1999. 流体底辟构造及其成因探讨. 地质科技情报, 18(2): 19—22.