

文章编号: 1001-6112(2007)05-0441-05

# 南海北部陆缘晚期油气成藏机理及动力学过程

刘宝明<sup>1,2,3,4</sup>, 牛滨华<sup>1</sup>, 孙春岩<sup>1</sup>, 夏斌<sup>3</sup>, 李绪宣<sup>2</sup>, 金庆焕<sup>3,4</sup>

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国海洋石油总公司 中海石油研究中心, 北京 100027;

3. 中国科学院 边缘海地质重点实验室, 广州 510640; 4. 国土资源部 广州海洋地质调查局, 广州 100075)

**摘要:**总结了南海北部陆缘晚期(或浅层)油气藏的勘探技术和方法,指出晚期油气成藏具有海底麻坑、气烟囱、“地震模糊带”和“亮点”等地震异常特征,从地化特征上可划分为浅层生物气、成熟—高成熟热解气和高含 CO<sub>2</sub> 热解气等 3 种油气成藏类型。在研究新构造运动表现形式的基础上,分析了逆断层、正断层和底辟—走滑断层 3 个断层活动区的晚期油气成藏机理,指出断层晚期活动和后期快速沉降促进了油气的运移和再分配,晚期油气成藏主要沿莺歌海盆地莺东斜坡带、东方—乐东区和沿琼东南盆地二号断裂带及珠江口盆地拗陷边缘斜坡带等分布,有利于油气和天然气水合物的勘探。

**关键词:** 油气藏; 晚期成藏; 成藏动力学; 新构造运动; 南海北部陆缘

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

## LATE HYDROCARBON ACCUMULATION MECHANISM AND DYNAMICS OFFSHORE THE NORTHERN SOUTH CHINA SEA

Liu Baoming<sup>1,2,3,4</sup>, Niu Binhua<sup>1</sup>, Sun Chunyan<sup>1</sup>, Xia Bin<sup>3</sup>, Li Xuxuan<sup>2</sup>, Jin Qinghuan<sup>3,4</sup>

(1. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China*; 2. *Research Center of Science and Technology Department, CNOOC, Beijing 100027, China*; 3. *Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China*; 4. *Guangzhou Marine Geological Survey Bureau, Ministry of Land and Resources, Guangzhou, Guangdong 510075, China*)

**Abstract:** Exploration technologies and methods for late hydrocarbon accumulations offshore the northern South China Sea have been summarized in this paper. The late hydrocarbon accumulations are characterized by seismic anomalies such as bottom caves, gas chimneys, “obscure seismic area” and “bright points”. Based on geochemical features, three types of accumulations can be identified; biogas in shallow layer, mature-highly mature gas and thermal gas with high CO<sub>2</sub> content. According to neotectonism, late dynamics of petroleum systems related to thrust fault, normal fault as well as diapire-structure and strike-fault have been analyzed. The late movements of faults and the fast thermal subsidence have promoted hydrocarbon migration and redistribution with series of petroleum accumulation distributed along Yingdong ramp and Dongfang—Ledong area in the Yinggehai Basin, No. 2 fault zone in the Qiongdongnan Basin and edge ramps of depressions in the Pearl River Mouth Basin. It contributes to the exploration of hydrocarbon and hydrate offshore the northern South China Sea.

**Key words:** hydrocarbon reservoir; late hydrocarbon accumulation; dynamics of petroleum system; neotectonism; offshore the northern South China Sea

## 1 勘探概况

### 1.1 盆地油气勘探简况

南海北部陆缘发育珠江口、莺歌海和琼东南等大型沉积盆地,油气勘探相继取得了许多发现<sup>[1]</sup>。

自 1979 年在 Zhu—5 井发现具商业价值油流以来,珠江口盆地已发现数十个油气田和一批含油气构造,有近 20 个油田投入开发生产,连续 10 年原油产量超过千万吨,目前已成为我国海上重要的石油生产基地。莺歌海盆地<sup>[2]</sup>自 20 世纪 60 年代初

收稿日期: 2007-06-21; 修订日期: 2007-08-01。

作者简介: 刘宝明(1966—),男(汉族),江西吉安人,博士,教授,主要从事沉积盆地构造分析和石油、天然气水合物资源调查及其评估技术研究。

基金项目: 中国海洋石油总公司中菲越联合勘探项目(2006-KT-003)、中国科学院知识创新工程项目(kzcx2-sw-117-03)和国家自然科学基金项目(40306010)。

渔民报矿以来,已钻井 64 口,在东方一乐东区相继发现了 3 个浅层气田、7 个含气构造和包括斜坡带在内的众多大面积油气苗、气烟囱<sup>[3]</sup>。琼东南盆地自 1979 年钻探莺 9 井有原油发现至近几年实施的集束勘探为止,已钻探 28 个构造,发现 2 个气田和 10 个含油气圈闭,除发现崖城 13 气田外均未获得较大突破,其主要原因可能与该盆地存在北东向深大断裂和高含非烃气 CO<sub>2</sub> 有关<sup>[4]</sup>。油气勘探业已证实,在这些盆地中除发现众多中深层油气田外,还发现一批与新构造运动有关的晚期油气藏,且以浅层气为主。

### 1.2 浅层油气藏勘探技术

为了追溯油气成藏及其与浅层和(或)地表表象之间的内在联系,人们长期进行了众多调查研究方法的探索<sup>[5~11]</sup>。自从南海北部陆缘陆续发现许多油气藏以来,该海域也被列入国际上开展此项研究课题的重点地区之一。利用航空微波遥感<sup>[12,13]</sup>、航空激光荧光(珠江口盆地已实施 51 052 km)<sup>[14]</sup>、浅层航空磁测、航空地面伽马射线和地貌特征分析技术,可以分析油气的微渗漏机理<sup>[5,6]</sup>,以及利用油气渗漏烃蚀变带引起的磁异常——“磁亮点”来指导油气勘探<sup>[15]</sup>。由于油气渗漏引起地质体异常特征,还以沉积物、底质水和海面大气等样品开展了地球化学测量<sup>[16,17]</sup>,分析了烃类气测、水化学、汞测量、全扫描荧光、色质谱、同位素和蚀变碳酸盐等指标,认为这些指标的异常与所发现含油气构造具有很好的匹配性,从而能较好地指导当地的油气勘探工作。还有学者<sup>[18]</sup>力图通过提高地震处理技术来达到有效识别盆地中存在的浅层气藏之目的。另外,国家近几年在研究区实施的天然气水合物调查专项过程中,相继采用了许多与浅层油气成藏相关的调查研究手段,也报道了该海域存在这种新型能源的温压条件<sup>[19~22]</sup>,得出了勘查地球化学方法也适用于勘查天然气水合物的重要认识<sup>[23]</sup>。

### 1.3 浅层油气藏分布特征

研究区最早发现油气苗(或渗漏)是在莺歌海盆地<sup>[1,3]</sup>,均发育在前第三系基底之上并围绕盆地北部斜坡带 4 个鼻状构造(莺歌海嘴、望楼港、西鼓岛、南山角)分布,后来又在盆地中央泥底辟带东方一乐东区发现气田群。研究<sup>[24,25]</sup>认为,东方 1—1 气田储集层为埋深 1 200~1 900 m 的上新统砂岩,其主要成气期发生在上新世—第四纪快速热沉降阶段。还有一些学者<sup>[26,27]</sup>在分析乐东气田群时指出,气体充注时间很晚,发生在 1.2~1.0 Ma 之间(即很晚成藏),主要沿泥底辟带发育的断层形成

浅层气藏<sup>[28,29]</sup>。近几年中国海洋石油总公司采用“集束”勘探技术,在琼东南盆地沿二号断裂带也发现了一些浅层气藏<sup>[19]</sup>。珠江口盆地也发现许多浅层气藏,例如 LH19—3—1 井发现含 57 m 厚的浅层气;在 PY3—1, PY4—1, PY20—1 等构造发现与含气构造相关的地震异常特征。近年来随着白云凹陷深水油气勘探步伐的加快,围绕凹陷北坡发现了浅层气藏“亮点”。

## 2 新构造运动与晚期油气成藏特征

### 2.1 新构造运动特征

研究区位于西太平洋新构造域活动带中,中国境内发生的新构造运动在时间上陆地<sup>[20]</sup>与海域<sup>[19,23]</sup>基本相当,结合海域的构造演化特征,文中所指的与晚期油气成藏有关的新构造运动是指发生在中新世末以来的、具有独特表现形式的构造运动。

晚期断裂活动和形成晚期构造型圈闭,是新构造运动最直观、最重要的表现形式。莺—琼盆地一号、二号断裂带至今仍表现出具有活动特征,从而沿此形成一系列构造型圈闭,目前仍是莺—琼盆地的主要油气勘探领域,并在莺东斜坡带发育众多的油气苗。珠江口盆地滨海断裂及坳陷边缘断裂带也具有活动性,何光玉等<sup>[30]</sup>所指的第二期断层活动即发生在中中新世东沙运动之后,形成了一批具有挤压性质的构造(如背斜、半背斜等),并使近八成的断层复活形成晚期活动断层<sup>[7,31]</sup>。这些复活后的断裂系统非常有利于将封闭于下第三系的油气垂向输导至上覆的海相储盖组合中成藏,形成晚期油气藏和油气逸散。

晚期断块垂向活动速率变化和沉积沉降中心迁移,是新构造运动的又一重要表现。陈伟光等<sup>[32]</sup>认为,断块构造运动变化速率的差异,致使沉积沉降中心发生迁移,最典型的就是莺歌海盆地中央坳陷带,又如珠江口、琼东南盆地沉积中心也具有由北向南迁移的现象,从而形成盆地“南北分带、东西分块”的构造格局。

天然地震较活跃。虽然研究区与渤海地区同属西太平洋地震活动带,但地震活动较后者明显偏弱。Wei 等<sup>[33]</sup>分析了 1969 年 12 月 17 日和 20 日发生在琼东南盆地松涛凸起上的 2 次地震活动,指出它们都与南北向挤压、东西向张性应力场背景下形成的北东—南西向走滑断裂有关,这种应力场正与因印支地块与中国大陆发生连续碰撞而使红河断裂带晚期发生右行走滑特征相一致<sup>[2]</sup>。还有学者<sup>[34]</sup>分

析了华南地震活动特征,并将该区的沉积盆地分为新生型、继承型和完成型等 3 种类型,由此分析了地震活动内、外带与断裂体系的关系,并进一步指出新构造运动的强弱主要发生在新生型盆地中。

海底地形地貌的改造和海底地质灾害的发生。自 20 世纪 70 年代珠江口盆地油气勘探取得重大突破以来,在联合国开发计划署的支持下相继开展和完成了多个图幅的南海北部环境工程地质调查和研究工作,获得了一批丰硕成果<sup>[35]</sup>,为我国近海海岸带功能的开发利用提供了重要依据。笔者认为,晚期断裂活动、地震活动及其引发的火山活动和重力流,能对海底地形地貌进行改造,由此也引发一些海底地质灾害,并对晚期油气成藏和该区天然气水合物成藏的气源条件进行再分配,塑造一些新的浅层气藏类型。

### 2.2 地震特征

地震记录能较好地反映地质体在地质演化过程中的各种历史记录。如上所述,本区晚期油气成藏与新构造运动引发的断层复活、差异沉积沉降、底辟构造和地震、火山活动等有关,从而在浅层电火花剖面或旁测声纳记录上可见海底麻坑<sup>[3]</sup>、气烟囱(图 1)<sup>[28]</sup>、速度反转和振幅空白带等地震异常特征,指示出油气随着流体压裂突破向浅层运移、散失和聚集的动平衡过程。由于高压流体沿着发育在底辟构造上的张性断裂运移,还可形成连续性差的低速“地震模糊带”,其速度比底辟构造翼部低很多,但仍可用正常速度分析和叠前深度偏移技术来改进其反射连续性;还可见浅层气藏“亮点”,具有人们常说的“红旗飘飘”特征(图 2)<sup>[36]</sup>,并指示与晚期断层活动有关。

### 2.3 地球化学特征

莺歌海盆地以晚期油气成藏为特征,在莺东斜坡带和东方一乐东中央泥底辟带较发育;原油具有高密度、高含硫、高初馏点、高煤油—柴油馏分(轻

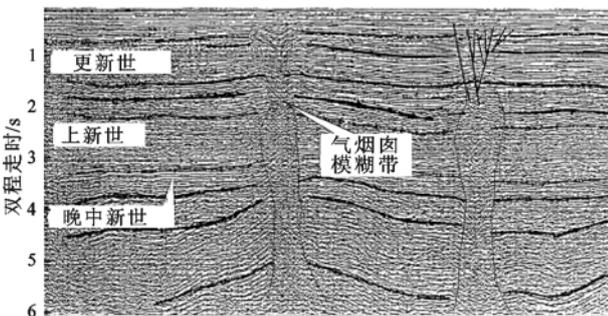


图 1 莺歌海盆地乐东浅层气藏典型地震剖面<sup>[28]</sup>

Fig. 1 Typical seismic section of Ledong gas accumulation in the Yinggehai Basin

馏量)、低凝固点和粘度、低胶质及沥青质含量、不含蜡等特点,具有典型的海相高硫低蜡优质原油的物理化学特征,由此推测可能来自不同成熟演化阶段相对深水环境的偏腐泥型的海相生源母质。

从地化指标看,研究区可划分出浅层生物气、成熟—高成熟热解气和 CO<sub>2</sub> 含量较高的高成熟热解气等 3 种类型(图 3a),从而形成纵向式的油气成藏模式,由此相应划分为 3 期油气成藏史(图 3b)。第一期(I 型)指来自储层附近未成熟泥岩的生物气充注圈闭构造中,表现为天然气以甲烷为主(87.09%~88.14%),重烃含量很低,干燥系数高达 0.98~0.99,且甲烷 δ<sup>13</sup>C 明显偏轻(-63.14‰~-55.72‰),具与我国鄂尔多斯涩北大型生物气田类似的地化特征;第



图 2 珠江口盆地白云凹陷北坡浅层含气亮点剖面<sup>[36]</sup>

Fig. 2 Seismic anomalous section offshore the northern slope of Baiyun Sag in the Pearl River Mouth Basin

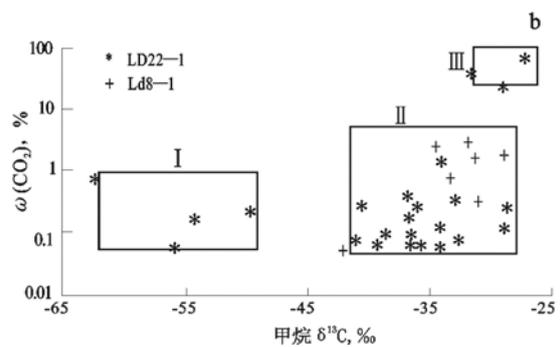
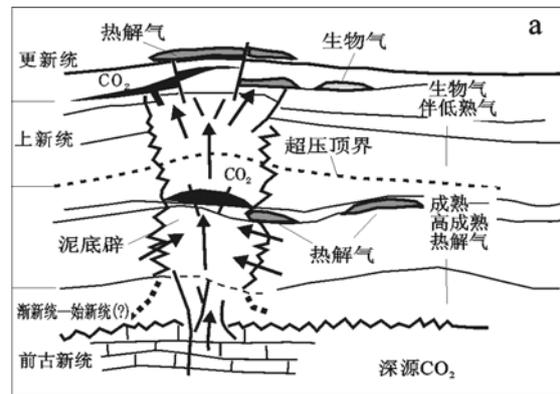


图 3 莺—琼盆地油气充注类型(a)及其地化特征(b)对比

Fig. 3 Hydrocarbon accumulation types (a) and geochemical features (b) in the Yinggehai-Qiongdongnan Basin

二期(Ⅱ型)为成熟—高成熟热解气,具有CH<sub>4</sub>含量高、有机成因CO<sub>2</sub>含量很低(小于1%)的特点,甲烷δ<sup>13</sup>C介于-40.1‰~-28.6‰,表明是来自较深部的成熟—高成熟热成熟气,并继生物气之后充注成藏,通常产于生物气层之下;第三期(Ⅲ型)高含CO<sub>2</sub>热解气,是指因快速沉积而伴随底辟强烈活动,高含CO<sub>2</sub>气体大量充注至底辟构造(壳源成因CO<sub>2</sub>)或沿二号断裂带运移至上部圈闭构造(壳—幔混源CO<sub>2</sub>)中成藏,气藏最大的地化特点是高含CO<sub>2</sub>具有无机成因,可能是由含钙碳酸盐矿物热解和深部高成熟热解气沿二号大断裂运移上来的混合气源组成,由此造成气藏具有非烃气CO<sub>2</sub>含量高(21.5%~80.4%)、甲烷δ<sup>13</sup>C值偏重(-5.74‰~-0.56‰)的地化特征,这与近年来实施的集束勘探结果相一致。有关珠江口盆地晚期油气藏的地化资料较少,但基本认为该盆地主要以浅层生物气和有机成因热解气为主。

### 3 油气藏类型及勘探意义

南海北部晚期油气藏中以浅层气藏为主,存在浅层生物气、成熟—高成熟热解气和高含CO<sub>2</sub>热解气等3种成藏类型(图3),其成因与盆地晚中生代以来的构造演化环境及盆地类型有关。从构造应力场来看(图4),研究区东部是以西太平洋板块向西与欧亚板块东南缘构造挤压特征<sup>[37]</sup>为主,向西逐渐变为欧亚板块东南缘地壳减薄(包括南海北缘

张裂性)、与底辟走滑构造有关和以欧亚板块南缘与印澳板块构造演化共同作用为主的特征,相应形成台湾造山带、珠江口—琼东南张裂型盆地和莺歌海走滑拉分型盆地及北部湾至中国内陆的断陷型盆地等,由此可划分出逆断层区、正断层区和泥底辟带—走滑断层区等几个与晚期新构造运动有关的断层活动区。东部台湾造山带由于缺乏晚新生代沉积而使早期形成的油气藏发生油气渗漏形成油气苗;而在海区由于沉积物源丰富、沉降速率较快,加速了新生代油源岩的成熟,在新构造运动作用下有利于油气的晚期成藏。由此在莺东斜坡带、东方—乐东泥底辟带和珠江口—琼东南盆地神弧、东沙隆起带及大型坳陷边缘斜坡带都可见油气苗和油气渗漏带(图4),这些都对油气勘探,尤其是研究区深水油气勘探和天然气水合物新能源勘探具有重要指示意义。

### 4 结论

- 1)研究区晚期(或浅层)油气藏主要分布在莺歌海盆地莺东斜坡带、东方—乐东泥底辟带和琼东南盆地二号断裂带以及珠江口盆地神弧、东沙隆起、坳陷边缘斜坡带中。
- 2)新构造运动的主要表现形式有晚期断裂活动和晚期圈闭形成、沉积沉降中心迁移和天然地震较活跃以及海底地形地貌改造、海底地质灾害发生

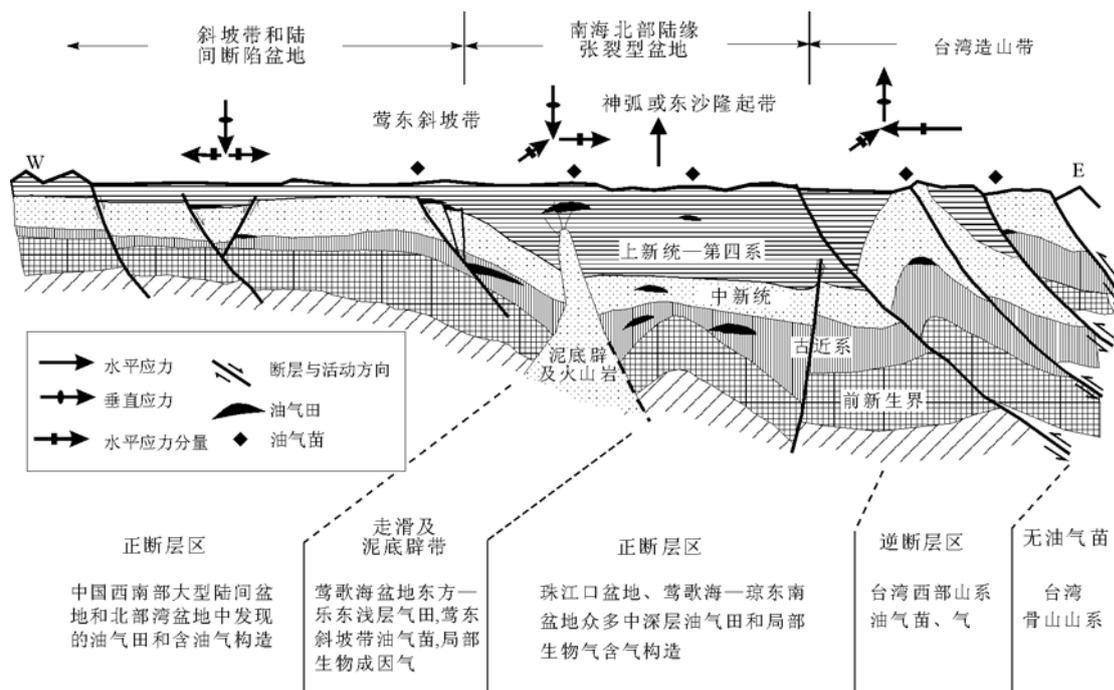


图 4 中国南海北部陆缘沉积盆地构造环境与油气成藏模式

Fig. 4 Hydrocarbon accumulation pattern and basin tectonic settings offshore the northern South China Sea

等,新构造运动控制了油气成藏体系及浅层圈闭构造的展布,晚期断层活动和快速沉降促进了油气的运移和再分配。

3)晚期油气成藏具有海底麻坑、气烟囱、“地震模糊带”和“亮点”等地震异常特征,从地化特征上可划分出浅层生物气、成熟—高成熟热解气和富含CO<sub>2</sub>热解气等3种成藏类型,反映出油气随流体压裂突破向浅层逸散、聚集的动平衡过程及其相应成藏特征。

4)总结了逆断层、正断层和底辟—走滑断层等3个与晚期新构造运动有关的断层活动区,建立了研究区油气成藏模式,指出晚期油气成藏渗漏带和油气苗分布区,对南海北部深水油气勘探和天然气水合物新型能源调查具有勘探指示意义。

#### 参考文献:

- 1 龚再升,李思田. 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
- 2 刘宝明,夏 斌,李绪宣等. 红河断裂带东南的延伸及其构造演化意义[J]. 中国科学 D 辑:地球科学,2006,36(10):914~924
- 3 何家雄,李明兴,黄保家. 莺歌海盆地北部斜坡带油气苗分布与油气勘探前景剖析[J]. 天然气地球科学,2000,11(2):1~10
- 4 刘宝明,夏 斌,李绪宣等. 中国东部及南海西部陆缘 CO<sub>2</sub> 气藏形成机理[J]. 矿物岩石地球化学通报,2004,23(3):207~212
- 5 Donald F S, Burson K R, Thompson C K. Model for hydrocarbon microseepage and related near-surface alterations [J]. AAPG Bulletin,1999,83(1):170~185
- 6 Brown A. Evaluation of possible gas microseepage mechanisms[J]. AAPG Bulletin,2000,84(11):1775~1789
- 7 龚再升. 中国近海含油气盆地新构造运动和油气成藏[J]. 石油与天然气地质,2004,25(2):133~139
- 8 Duncan S M. Relationships between seepage, tectonics and subsurface petroleum reserves[J]. Marine and Petroleum Geology,1993,10(6):606~619
- 9 贾承造,何登发,石 昕等. 中国油气晚期成藏特征[J]. 中国科学 D 辑:地球科学,2006,36(5):412~420
- 10 龚再升,王国纯. 渤海新构造运动控制晚期油气成藏[J]. 石油学报,2001,22(2):1~8
- 11 米立军. 新构造运动与渤海海域上第三系大型油气田[J]. 中国海上油气(地质),2001,15(1):21~28
- 12 黄晓霞,朱振海. 海洋油气资源的遥感探测技术[J]. 地质科技情报,1997,16(增刊):89~94
- 13 徐瑞松. 南中国海海洋油气遥感调查研究[J]. 国土资源遥感,2003,55(1):13~15
- 14 陈长民. 珠江口盆地东部石油地质及油气藏形成条件初探[J]. 中国海上油气,2000,14(2):73~83
- 15 郝天珧,朱振海,张明华等. 海洋油气渗漏烃蚀变带的地球物理检测及在中国海区的应用[J]. 地球物理学报,2001,44(2):245~250
- 16 陈汉宗,周 蒂,王 平. 南海北部含油气构造上方化探异常研究[J]. 热带海洋,1997,16(3):8~14
- 17 孙春岩,王宏语,牛滨华等. 西沙海槽研究区天然气水合物地球化学勘探[J]. 地球科学,2004,29(2):135~140
- 18 李绪宣. 莺歌海盆地浅层气藏的地震识别技术研究[J]. 天然气工业,1999,19(1):52~57
- 19 王宏斌,黄永祥,梁 劲等. 南海北部陆坡坳陷断裂带中水合物赋存的温压场环境[J]. 现代地质,2006,20(1):103~108
- 20 吴时国,张光学,郭常升等. 东沙海区天然气水合物形成及分布的地质因素[J]. 石油学报,2004,25(4):7~12
- 21 蒋少涌,杨 涛,薛紫晨等. 南海北部海区海底沉积物中孔隙水的 Cl<sup>-</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 浓度异常特征及其对天然气水合物的指示意义[J]. 现代地质,2005,19(1):45~54
- 22 孙春岩,王维熙,牛滨华等. 气态烃快速探测系统在海洋油气资源勘探中的应用[J]. 地质与勘探,2003,39(6):49~52
- 23 牛滨华,孙春岩,苏 新等. 勘查地球化学方法适用于勘查天然气水合物的依据[J]. 现代地质,2005,19(1):61~66
- 24 董伟良,黄保家. 东方 1—1 气田天然气组成的不均一性与幕式充注[J]. 石油勘探与开发,1999,26(2):15~18
- 25 Hao F, Li S T, Gong Z S, et al. Thermal regime, interreservoir compositional heterogeneities, and reservoir-filling history of the Dongfang Gas Field, Yinggehai Basin, South China Sea [J]. AAPG Bulletin,2000,84(5):607~628
- 26 朱伟林,王振峰,黄保家. 莺歌海盆地天然气成藏动力学[J]. 地球科学,2004,29(5):563~568
- 27 Huang B J, Xiao X M, Hu Z L. Geochemistry and episodic accumulation of natural gases from the Ledong gas field in the Yinggehai Basin, offshore South China Sea[J]. Organic Geochemistry,2005,36:1689~1702
- 28 Xie X N, Li S T, Dong W L, et al. Evidence for episodic expulsion of hot fluids along faults near diapiric structure of the Yinggehai basin, South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology,2001,18:715~728
- 29 何家雄,夏 斌,刘宝明等. 莺歌海盆地泥底辟热流体上侵活动与天然气及 CO<sub>2</sub> 运聚规律剖析[J]. 石油实验地质,2004,26(4):349~358
- 30 何光玉,吴景富,刘海滨等. 南海珠三坳陷油气系统分析[J]. 石油实验地质,2000,22(1):35~39
- 31 李平鲁. 珠江口盆地新生代构造运动[J]. 中国海上油气(地质),1993,7(6):11~17
- 32 陈伟光,魏柏林,赵红梅等. 珠江三角洲地区新构造运动[J]. 华南地震,2002,22(1):8~18
- 33 Wei B Z, Chung W Y. Strike-slip faulting on the northern margin of the South China Sea: evidence from two earthquakes offshore of Hainan Island, China, in December 1969[J]. Tectonophysics,1995,241(1-2):55~56
- 34 陈伟光. 华南沿海沉积盆地的新构造运动及其与地震的关系[J]. 华南地震,1995,15(2):55~61
- 35 冯志强,冯文科,薛万俊等. 南海北部地质灾害及海底工程地质条件评价[M]. 南京:河海大学出版社,1996
- 36 庞 雄,陈长民,朱 明等. 南海北部陆坡白云深水区油气成藏条件探讨[J]. 中国海上油气(地质),2006,18(3):145~149
- 37 周珍琦. 闽西南地区推覆构造特征[J]. 石油实验地质,2006,28(1):38~41