

doi:10.3799/dqkx.2011.086

南海北部深水区白云凹陷地温—地压系统特征及其石油地质意义

郭志峰¹, 刘震¹, 王伟¹, 张功成², 沈怀磊²

1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2. 中国海洋石油研究总院, 北京 100027

摘要: 南海北部深水区白云凹陷具有典型的高温高压特征。应用地温—地压系统概念, 分析白云凹陷地层温度、地层压力及地温—地压系统在纵向上和平面上的分布特征, 并探讨其与油气分布的关系。研究认为白云凹陷发育高压型复式地温—地压系统, 即浅部为静压型地温—地压系统, 深部为高压型地温—地压系统。同时将地层温度与地层压力进行平面耦合, 在平面上将白云凹陷划分为6种地温—地压系统分区, 白云凹陷北坡位于高温常压区和高温高压区, 主洼带主体处在超高温高压区, 主洼中心位于超高温超高压区, 南坡位于高温高压区。已发现天然气藏主要分布在地温—地压系统的相对低能区。白云凹陷独特的高压型地温—地压系统可为油气运移提供超强劲力, 并控制油气藏分布。

关键词: 南海北部深水区; 海洋地球物理; 石油地质; 地温—地压系统; 油气分布。

中图分类号: P738

文章编号: 1000-2383(2011)05-0831-06

收稿日期: 2011-05-20

Characteristics of Geotemperature-Pressure Systems and Their Implications for Petroleum Geology at Baiyun Depression, Deep-Water Area of Northern South China Sea

GUO Zhi-feng¹, LIU Zhen¹, WANG Wei¹, ZHANG Gong-cheng², SHEN Huai-lei²

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2. Research Institute of China National Offshore Oil Corporation, Beijing 100027, China

Abstract: Baiyun depression is characterized by high geotemperature and high pressure formation. By theory of geotemperature-pressure system, the geotemperature, formation pressure and geotemperature-pressure system at Baiyun depression and their relationships with hydrocarbon distribution are analyzed in vertical and lateral sections. Research shows that overpressure composite geotemperature-pressure system develops at Baiyun depression, namely normal geotemperature-pressure system of shallow zone and overpressure system of deep zone. Based on coupling characteristics of geotemperature and pressure, Baiyun depression is divided into six geotemperature-pressure system divisions. The northern slope belt is located in the area with high temperature and normal pressure, as well as high temperature and high pressure. The main sag is mainly located in the area with ultra high temperature and high pressure, and the center belt belongs to ultra high temperature and ultra high pressure region. The southern slope belt is located in the area with high temperature and high pressure. Natural gas pools are mainly distributed in relative low energy area. The special characteristics of geotemperature-pressure system at Baiyun depression provide strong power for hydrocarbon migration, and control the distribution of oil and gas reservoirs.

Key words: deep-water area of northern South China Sea; marine geophysics; petroleum geology; geotemperature-pressure system; distribution of hydrocarbon.

地层温度是地质环境中最基本的物理参数。在有机质热演化过程中, 温度自始至终都是一个极为

活跃的控制因素。高地层温度有助于沉积岩中有机质向油气转化, 而过低的地层温度不利于有机质生

基金项目: 国家“973”计划项目 (No. 2009CB219400)。

作者简介: 郭志峰 (1982—), 男, 博士研究生, 主要从事油气藏形成与分布方向研究。E-mail: gzhfeng666@yahoo.com.cn

烃. Pusey(1973)通过大量研究,提出“液态窗”的概念,认为世界上绝大多数液态烃是在 $65.5 \sim 147\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围之内生成的. 地层温度也与岩石物性密切相关, Somerton *et al.* (1965)在高温条件下对大量砂岩岩芯进行实验分析,探讨了地层温度对岩石物性的影响;刘均荣等(2001)通过在高温环境下对不同类型岩石的实验研究,分析了岩石渗透率在高温作用下发生变化的机理. 地温场是油气成藏动力学研究的重要组成部分,叶加仁和杨香华(2001)分析总结国内外典型盆地地温场资料,强调热流体活动对成藏动力学研究意义重大.

地层压力直接影响沉积盆地油气生成、运移和聚集,在油气勘探、开发及资源评价中的意义日益受到重视. Hunt(1990)综合大量实例阐述“异常压力流体封存箱”理论,该理论将地下地层单位按地层压力划分为不同的水动力系统,不同水动力系统之间靠密封层隔开,彼此间流体压力不能相互连通;郝芳等(2006)通过对多个盆地实际资料对比分析,认为地层压力会对有机质热演化和生烃作用产生重要影响,超压对有机质热演化具有抑制作用,能使常压盆地中已过成熟的烃源岩保持在有利的生、排烃阶段,从而为深层油气成藏提供较好的烃源岩条件. Barker(1972)首次提出“水热增压”概念,探讨封闭条件下由于温度升高导致的流体压力迅速增大效应. 地层压力是油气层产能估算的重要指标,由于超压储层具备相对较高的孔隙度和渗透率,那么地层压力大的储层通常产能大,反之,地层压力小的储层产能低;另外在钻井工程中,精准的地层压力预测对保证钻井安全、提高钻探效率和降低钻井成本具有极其重要的作用.

南海北部深水区盆地是我国油气勘探的热点区域,已发现若干大中型油气田,拥有巨大的油气资源潜力和广阔的勘探前景(张功成等,2007). 南海北部深水区盆地具有独特的石油地质特征,米立军等(2009)统计分析了大量地温梯度和大地热流数据,揭示了南海北部深水区现今地温场具有“热盆”属性,平均地温梯度约为 $3.91\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,深水区比浅水区更“热”,存在显著的局部异常高温带,认为新生代岩石圈拉张减薄及新构造运动引发的岩浆和断裂活动是导致“热盆”特征的根本原因. 朱光辉等(2000)指出火山活动、莫霍界面埋深、断层活动和岩石性质是形成琼东南盆地高温特征的重要因素,且发现欠压实和生烃作用是琼东南盆地超压形成的机制. 刘福宁等(1994)以及杨计海(1999)对莺歌海盆

地超压成因做过大量研究工作,认为盆地快速沉降和泥底辟活动是超压形成的主要机制. 石万忠等(2006)应用盆地模拟技术研究了珠江口盆地白云凹陷地层压力演化及其与油气运移的关系,指出白云凹陷现今地层压力在浅水区为常压,在深水区为弱超压.

沉积盆地的地温场和地压场是相互影响且无法分隔的. 然而,迄今为止在实际研究中,多是进行地温场或地压场单方面研究,较少学者把二者结合起来进行整体分析. 刘震等(1997)提出地温—地压系统概念,以整体的、耦合的观点将地层温度和地层压力放入一个系统内进行综合分析,从而推动了地温—地压相结合以及油气藏在垂向上和平面上分布特征的理论研究. 从在柴达木盆地、准噶尔盆地、吐哈盆地、二连盆地、渤海湾盆地以及莺歌海盆等地区的应用效果来看(刘震等,2000,2005;肖焕钦等,2003;金博等,2008),利用地温—地压系统综合研究油气形成与分布是一种非常有效的方法.

由于南海北部深水区白云凹陷钻井数量稀少,钻遇层位较浅且井位主要分布在浅水区,开展深部和平面上地温场、地压场及地温—地压系统特征研究只能依靠地球物理手段来解决. 本文以实测地温数据、地层压力数据、地温模拟数据及地震地层压力预测数据为基础,应用地温—地压系统概念探究南海北部深水区白云凹陷地温—地压系统特征及其与油气分布的关系.

1 地温—地压系统基本理论

沉积盆地的地层温度和地层压力是一对彼此联系密切的物理量,如果将这两个物理量放入一个系统进行分析,那么含油气盆地的地温—地压系统基本属于一种封闭系统. 在这个系统内,地层温度与地层压力呈直线关系,但是在不同的地温—地压系统中,地温与地压的直线斜率不同. 同一沉积盆地中地温—地压关系在垂向上表现为“折线”模式.

沉积盆地一般具有 2 个或 2 个以上的地温—地压系统,根据地温—地压系统垂向发育特征可将其划分 3 种类型,即单一型地温—地压系统、高压型复式地温—地压系统和低压型复式地温—地压系统. 还可根据地层温度与压力系数组合关系进一步将盆地划分出不同类型的地温—地压系统能量分区(刘震等,2007).

2 工区地温—地压系统特征

白云凹陷具有典型的高温高压特征,本文在详细分析白云凹陷地温场和地压场资料的基础上,进一步开展对该区地温—地压系统特征及其与油气分布关系的研究。

2.1 地温场纵向特征

白云凹陷位于南海北部珠江口盆地珠二坳陷,北接番禺低隆起,南至南部隆起带,西连云开低凸起,东邻东沙隆起,总体上为东西走向(图1)。实测地层温度数据主要集中在北部浅水区,深水区长温数据稀少。地层温度随埋深增加而升高,呈稳定的直线带状对应关系。地温梯度集中在2.5~4.5℃/100 m之间,平均地温梯度约为3.5℃/100 m,为明显的高温区。在2.5 km深度左右出现高温异常,地温梯度约为4.0℃/100 m(图2),可能是由于岩浆和断裂活动导致深部高温高压流体沿断裂及裂隙向浅层传递引起。

2.2 压力场纵向特征

实测压力资料揭示白云凹陷在3 km以上地层基本保持静水压力状态,压力系数为0.9~1.1;在4 km深度左右出现高压异常,压力系数高达1.4。总体来讲,白云凹陷地压场表现为浅层静压和深层超压的格局(图3)。

由于实测地层压力资料缺少且主要分布在浅水区,同时钻遇层位较浅,有必要利用地震资料进行地层压力预测,在平面上和深部层系开展地压场特征研究。

2.3 地温—地压系统特征

本文应用地温—地压系统概念探究南海北部深水白云凹陷地温—地压系统纵向上和平面上的分布特征。

2.3.1 地温—地压系统基本特征 将白云凹陷实测地温和地层压力数据做交汇分析,根据地温—地

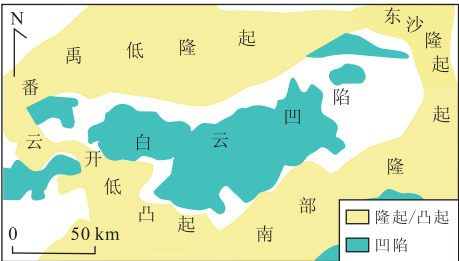


图1 白云凹陷构造位置

Fig.1 Structural location of Baiyun depression

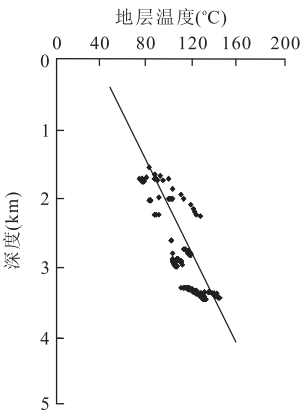


图2 白云凹陷实测地层温度与埋深关系

Fig.2 Relation between measured formation pressure and depth at Baiyun depression

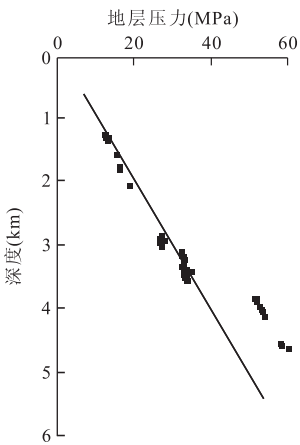


图3 白云凹陷实测地层压力与埋深关系

Fig.3 Relation between measured geotemperature and depth at Baiyun depression

压系统概念的“折线模式”认定白云凹陷为高压型复式地温—地压系统,浅部为静压型地温—地压系统,深部为高压型地温—地压系统,且2个系统分界明显(图4)。深部地温—地压关系斜率在分界面处突然变化,表明白云凹陷深部超压现象十分强烈,深部流体垂向运移能力强,促使油气向中浅部层系运移聚集。

2.3.2 地温—地压系统平面分区划分方案 对沉积盆地中特定层系而言,为综合反映该层系地层温度和地层压力所体现的能量在平面上的分布特征,需根据实际地质背景确定目标层系地层温度和地层压力分界值,进而研究地温—地压系统平面分区特征。

对于地压场,为消除深度对压力影响,本文采用压力系数来描述地压场平面变化。目前,学界对于压

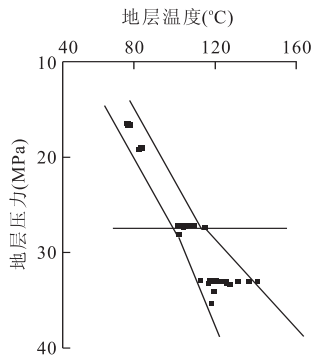


图 4 白云凹陷地温—地压系统特征

Fig. 4 Characteristics of geotemperature-pressure systems in Baiyun depression

力划分方案有不同标准,埃克森石油公司认为压力系数 1.0~1.27 为常压,1.27~1.50 为过渡带,1.50~1.73 为超压带,1.73~1.96 为强超压;原苏联分类方案将压力系数 1.00~1.05 定为常压,1.05~1.30 为稍高压,1.3~2.0 为超压,大于 2.0 为超高压(马启富等,2000);郝芳(2005)认为压力系数 0.96~1.96 为常压,1.06~1.27 为弱超压,1.27~1.73 为超压,大于 1.73 为强超压。

通过对白云凹陷地温和地压资料综合分析,本文将 120 °C 和 165 °C 确定为地层温度分界值,0.9、1.2 和 1.7 为压力系数分界值,并依此标准将白云凹陷层序 E 的地温—地压系统划分为 6 种分区:高温常压区、高温高压区、高温超高压区、超高温常压区、超高温高压区和超高温超高压区,其能量依次增大(图 5)。

2.3.3 地温—地压系统平面分布特征 沉积盆地中地温—地压系统纵向模式代表不同的地温—地压系统类型,控制油气在垂向上分布;而根据地层温度

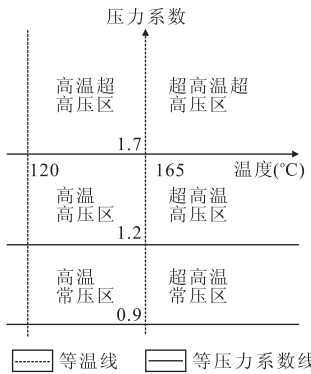


图 5 白云凹陷层序 E 地温—地压系统平面分区标准

Fig. 5 Criterion of plane partition of geotemperature-pressure systems of sequence E in Baiyun depression

和压力系数划分的平面分区反映了流体能量在平面上的分布特征,控制油气横向运移方式。

采用上述分区方案对白云凹陷进行地温—地压系统平面分布特征研究.层序 E 发育巨厚泥岩,是白云凹陷的主力烃源岩层系.由于同一层序不同体系域的地温—地压系统特征并不相同,为了精细描述地温—地压系统特征,本文分别对层序 E 高位体系域和海侵体系域开展地温—地压系统特征研究。

从层序 E 高位体系域地温—地压系统平面分区图可以看出,高位体系域整体处在高温超压区,凹陷西北部斜坡带为高温常压区,主洼带为超高温高压区,主洼带中心部位为超高温超高压区,在主洼东北部出现小范围高温超高压区(图 6)。

从层序 E 海侵体系域地温—地压系统平面分区图可以看出,海侵体系域整体处在高温超压区,凹陷西北部斜坡带存在小范围的高温常压区,主洼带为超高温高压区,主洼带中心部位为超高温超高压区,但是,海侵体系域没有高温超高压区(图 7)。

从高位和海侵体系域地温—地压系统平面分布特征可以看出层序 E 整体处于高温高压环境.温度是控制有机质向油气转化的最有效作用因素,层序 E 内烃源岩在高地温环境下生烃潜力巨大;而地层压力是油气运移的重要动力来源,层序 E 内烃源岩生成的油气在强超压体系控制下可向相对低压区运

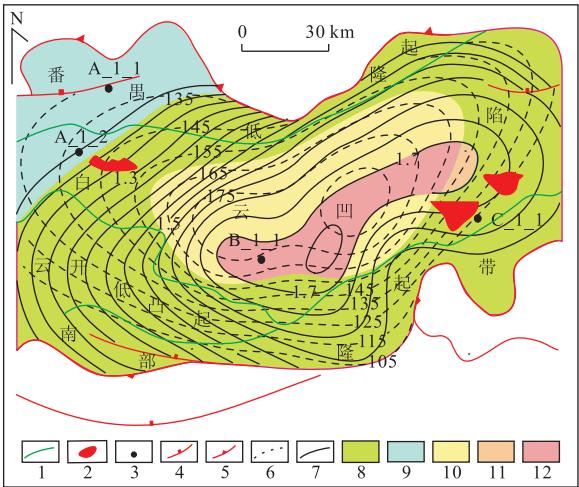


图 6 白云凹陷层序 E 高位体系域地温—地压系统平面分区

Fig. 6 Partition map showing geotemperature-pressure system of high stand system tract of sequence E in Baiyun depression

1. 构造边界;2. 气藏(浅部层系);3. 井位;4. 断层;5. 尖灭层;6. 地层温度(°C);7. 压力系数;8. 高温高压区;9. 高温常压区;10. 超高温高压区;11. 高温超高压区;12. 超高温超高压区

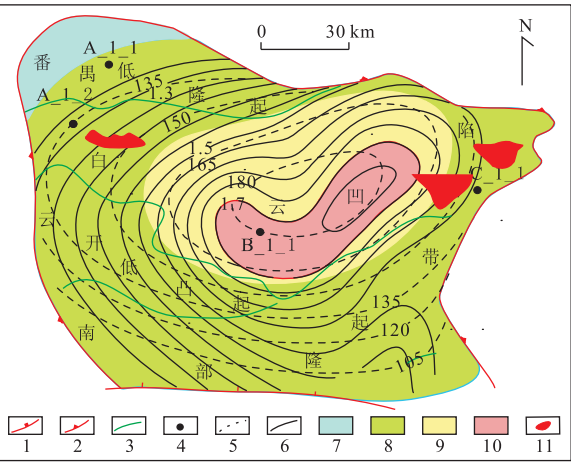


图7 白云凹陷层序E海侵体系域地温—地压系统平面分区
Fig. 7 Partition map showing geotemperature-pressure system of low stand system tract of sequence E in Baiyun depression

1. 断层;2. 尖灭线;3. 构造边界;4. 井位;5. 地层温度(℃);6. 压力系数;7. 高温常压区;8. 高温高压区;9. 超高温高压区;10. 超高温超高压区;11. 气藏(浅部层系)

聚成藏。虽然层序E高位和海侵体系域地层发育特征存在较大差异,但两者的地温—地压系统整体分布特征十分相近。高位和海侵体系域中心部位都处于高能量区,即超高温超高压区和超高温高压区,且都位于白云凹陷主洼带,而番禺低隆起和南部隆起带的能量相对较弱。

3 地温—地压系统与油气分布关系

目前,在白云凹陷已发现的大中型气藏位于地温—地压系统相对低能区。大型气藏位于能量较强的超高温高压区边缘和高温高压区的浅部层系中,深层天然气能够在强动力推动下沿着断层、裂隙向上快速运移至浅部层系聚集成藏,且运移距离较短。白云北坡番禺低隆起的中型气藏位于高温常压区和高温高压区的浅部层系中,其深部地温—地压系统能量相对于主洼带稍弱,所以深层天然气沿着断层、裂隙向上运移至浅层的时间会大于主洼带油气运移时间,并且要经过较长距离运移。

虽然迄今为止白云凹陷已发现的天然气藏集中在浅部层系,这些天然气藏的形成与断裂活动密切相关,但是根据高压型复式地温—地压系统的基本特征预测,系统内下部层系中极有可能发育与断裂活动无关的、孤立的超压型岩性油气藏。

综上分析,白云凹陷高压型复式地温—地压系

统控制油气藏分布,大中型油气藏主要分布于能量较强的地温—地压系统分区及其边缘。查明地温—地压系统分布特征对白云凹陷油气藏分布预测及勘探部署具有十分重要的指导意义。

4 结论

(1)白云凹陷发育高压型复式地温—地压系统,浅部为静压型地温—地压系统,深部为高压型地温—地压系统,2个系统分界明显。高压型复式地温—地压系统可为深层油气向浅部静压型地温—地压系统运移聚集提供强劲动力。

(2)在平面上,层序E高位体系域和海侵体系域地温—地压系统整体能量分布特征相似,能量分布趋势从凹陷中心向边缘逐渐降低,主洼带流体能量最强,存在超高温超高压区和超高温高压区。天然气藏在高压型复式地温—地压系统控制下主要分布在相对低能的地温—地压系统平面分区。

References

Barker, C., 1972. Aquathermal pressuring: role of temperature in development of abnormal pressure zones. *AAPG Bulletin*, 56(10): 2068—2071.

Hao, F., 2005. Kinetics of hydrocarbon generation and mechanisms of petroleum accumulation in overpressure basins. Science Press, Beijing (in Chinese).

Hao, F., Zou, H. Y., Fang, Y., et al., 2006. Kinetics of organic matter maturation and hydrocarbon generation in overpressure environment. *Acta Petrolei Sinica*, 27(5): 9—18 (in Chinese with English abstract).

Hunt, J. M., 1990. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartment. *AAPG Bulletin*, 74: 1—12.

Jin, B., Liu, Z., Li, X. S., et al., 2008. Relationship between accumulation of natural gas and geotemperature-geopressure system in Yinggehai basin. *Natural Gas Geoscience*, 19(1): 49—55 (in Chinese with English abstract).

Liu, F. N., Yang, J. H., Wen, W. M., 1994. The geopressure field and its relation to petroleum migration in Qiongdongnan basin. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 8(6): 363—376 (in Chinese with English abstract).

Liu, J. R., Qin, J. S., Wu, X. D., 2001. Experimental study on relation between temperature and rocky permeability. *Journal of the University of Petroleum, China*, 25(4): 51—53 (in Chinese with English abstract).

Liu, Z., Dai, L. C., Zhao, Y., et al., 2005. Characteristics of

- geotemperature-pressure systems and their controlling functions on pools' distribution in the Jiyang depression. *Chinese Journal of Geology*, 40(1): 1—15 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z., He, W. Y., Han, J., et al., 2000. Relation of geotemperature-formation pressure systems with migration and accumulation of petroleum in the east of Junggar basin. *Journal of the University of Petroleum, China*, 24(4): 15—20 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z., Zeng, X. B., Zhang, W. X., et al., 1997. Relation between subsurface temperatures and formation pressures in sedimentary basins. *Acta Geologica Sinica*, 71(2): 180—185 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z., Zhao, Y., Liang, Q. S., et al., 2007. Formation and enrichment of subtle reservoir. Geological Publishing, Beijing, 3—14 (in Chinese).
- Ma, Q. F., Chen, S. Z., Zhang, Q. M., et al., 2000. Overpressure basin and hydrocarbon distribution. Geological Publishing, Beijing, 3—4 (in Chinese).
- Mi, L. J., Yuan, Y. S., Zhang, G. C., et al., 2009. Characteristics and genesis of geothermal field in deep water area of the northern South China Sea. *Acta Petrolei Sinica*, 30(1): 27—32 (in Chinese with English abstract).
- Pusey, W. C., 1973. How to evaluate potential gas and oil source rocks? *World Oil*, 176(5): 71—75.
- Shi, W. Z., Chen, H. H., Chen, C. M., et al., 2006. Modelling of pressure evolution and hydrocarbon migration in Baiyun depression, Pearl River Mouth basin, China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(2): 229—236 (in Chinese with English abstract).
- Somerton, W. H., Mehta, M. M., Dean, G. W., 1965. Thermal alteration of sandstones. *Journal of Petroleum Technology*, 17(5): 589—593. doi:10.2118/907-PA
- Xiao, H. Q., Liu, Z., Zhao, Y., et al., 2003. Characteristics of geotemperature and geopressure fields in the Jiyang depression and their significance petroleum geology. *Petroleum Exploration and Development*, 30(3): 68—70 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. H., 1999. Influence of geothermal-geopressure field on the migration and accumulation of nature gas in Ying-Qiong basin. *Nature Gas Industry*, 19(1): 39—43 (in Chinese with English abstract).
- Ye, J. R., Yang, X. H., 2001. Thermal fluid flow in sedimentary basins and its significance to pool-forming dynamics. *Acta Sedimentologica Sinica*, 19(2): 214—218 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. C., Mi, L. J., Wu, S. G., et al., 2007. Deepwater area: the prospecting targets of northern continental margin of South China Sea. *Acta Petrolei Sinica*, 28(2): 15—21 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G. H., Chen, G., Diao, Y. H., 2000. Characteristics of geotherm-pressure field and its relationship with hydrocarbon migration and accumulation in Qiongdongnan basin, South China Sea. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 14(1): 29—36 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 郝芳, 2005. 超压盆地生烃作用动力学与油气成藏机理. 北京: 科学出版社.
- 郝芳, 邹华耀, 方勇, 等, 2006. 超压环境有机质热演化和生烃作用机理. *石油学报*, 27(5): 9—18.
- 金博, 刘震, 李绪深, 等, 2008. 莺歌海盆地地温—地压系统特征及其对天然气成藏的意义. *天然气地球科学*, 19(1): 49—55.
- 刘福宁, 杨计海, 温伟明, 1994. 琼东南盆地地压场与油气运移. *中国海上油气(地质)*, 8(6): 363—376.
- 刘均荣, 秦积舜, 吴晓东, 2001. 温度对岩石渗透率影响的实验研究. *石油大学学报*, 25(4): 51—53.
- 刘震, 戴立昌, 赵阳, 等, 2005. 济阳坳陷地温—地压系统特征及其对油气藏分布的控制作用. *地质科学*, 40(1): 1—15.
- 刘震, 贺维英, 韩军, 等, 2000. 准噶尔盆地东部地温—地压系统与油气运聚成藏的关系. *石油大学学报*, 24(4): 15—20.
- 刘震, 曾宪斌, 张万选, 等, 1997. 沉积盆地地温与地层压力关系研究. *地质学报*, 71(2): 180—185.
- 刘震, 赵阳, 梁全胜, 等, 2007. 隐蔽油气藏形成与富集. 北京: 地质出版社, 3—14.
- 马启富, 陈斯忠, 张启明, 等, 2000. 超压盆地与油气分布. 北京: 地质出版社, 3—4.
- 米立军, 袁玉松, 张功成, 等, 2009. 南海北部深水地区地热特征及其成因. *石油学报*, 30(1): 27—32.
- 石万忠, 陈红汉, 陈长民, 等, 2006. 珠江口盆地白云凹陷地层压力演化与油气运移模拟. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(2): 229—236.
- 肖焕钦, 刘震, 赵阳, 等, 2003. 济阳坳陷地温—地压特征及其石油地质意义. *石油勘探与开发*, 30(3): 68—70.
- 杨计海, 1999. 莺—琼盆地温压场与天然气运聚关系. *天然气工业*, 19(1): 39—43.
- 叶加仁, 杨香华, 2001. 沉积盆地热流体活动及其成藏动力学意义. *沉积学报*, 19(2): 214—218.
- 张功成, 米立军, 吴时国, 等, 2007. 深水地区——南海北部大陆边缘盆地油气勘探新领域. *石油学报*, 28(2): 15—21.
- 朱光辉, 陈刚, 刁应护, 2000. 琼东南盆地温压场特征及其与油气运聚的关系. *中国海上油气(地质)*, 14(1): 29—36.