

莺歌海盆地高温超压环境下储层物性影响因素

姜涛,解习农

中国地质大学资源学院,湖北武汉 430074

摘要: 莺歌海盆地由于独特的沉积地层和温压场特征,使得盆地内的储层成岩演化也具有了与众不同的过程和特点。通过对莺歌海盆地内有钻井证实的两种超压体系类型(自源型和传导型)的对比研究,阐明了其成因差别及其石油地质意义,并详细论述了高温超压环境下储层物性的影响因素:(1)储层物性主要受沉积环境和成岩作用控制;(2)高地温梯度使砂岩的孔隙度衰减较快;(3)超压保存了一部分原生孔隙,这是深部储层还具有高孔隙度的最主要原因;(4)超压通过溶解等成岩作用产生了一些次生孔隙;(5)流体压裂突破过程中产生了大量的裂缝,有效地提高了储层渗透性。

关键词: 异常压力;储层物性;超压类型;莺歌海盆地。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2005)02-0215-06

收稿日期: 2004-09-30

Effects of High Temperature and Overpressure on Reservoir Quality in the Yinggehai Basin, South China Sea

JIANG Tao, XIE Xi-nong

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

Abstract: Research into hydrocarbon basins around the world has shown that overpressure is closely connected with hydrocarbon generation and distribution. Because of unique sedimentary sequences and temperature-pressure characteristics, reservoir diagenesis has larruping processes and traits. Through comparing two types of overpressure systems (self-source type and conduction type), confirmed by core and log, this paper illustrates their origin and hydrocarbon value, and sets forth the effects of high temperature and overpressure on reservoir qualities, which include: ① reservoir characteristics are mainly determined by sedimentary environment and diagenesis; ② high geotemperature gradient decreases sandstone porosity; ③ overpressure conserves parts of original porosity, which causes high porosity in a deep reservoir; ④ overpressure brings out much of secondary porosity in the processes of diagenesis; ⑤ fluid breakthrough causes cracks, which effectively increase reservoir permeability.

Key words: anomalous pressure; reservoir characteristics; overpressure type; Yinggehai basin.

0 引言

据统计,世界范围内已知有180个沉积盆地具有超压地层体系,占世界沉积盆地的2/3。其中,超压体与油气分布有关的约有160个沉积盆地(杜翎等,1995; Hunt, 1990; 马启富等,2000)。近年来,随着油气勘探的深入,我国也相继在莺歌海—琼东南盆地、东海陆架边缘盆地、渤海湾盆地等地区发现异

常高的压力现象,并且发现了丰富的油气藏。为了更好地进行储层评价来指导勘探,有必要明确超压是怎样影响储层物性的以及影响了多少。本文在分析影响储层物性的一般因素(沉积环境和成岩作用)的基础上,从莺歌海盆地超压实例出发,分2种类型(自源型超压和传导型超压)探讨了超压对储层物性的直接影响(保存原生孔及产生裂缝等),以及通过影响成岩作用对储层物性造成的间接影响。

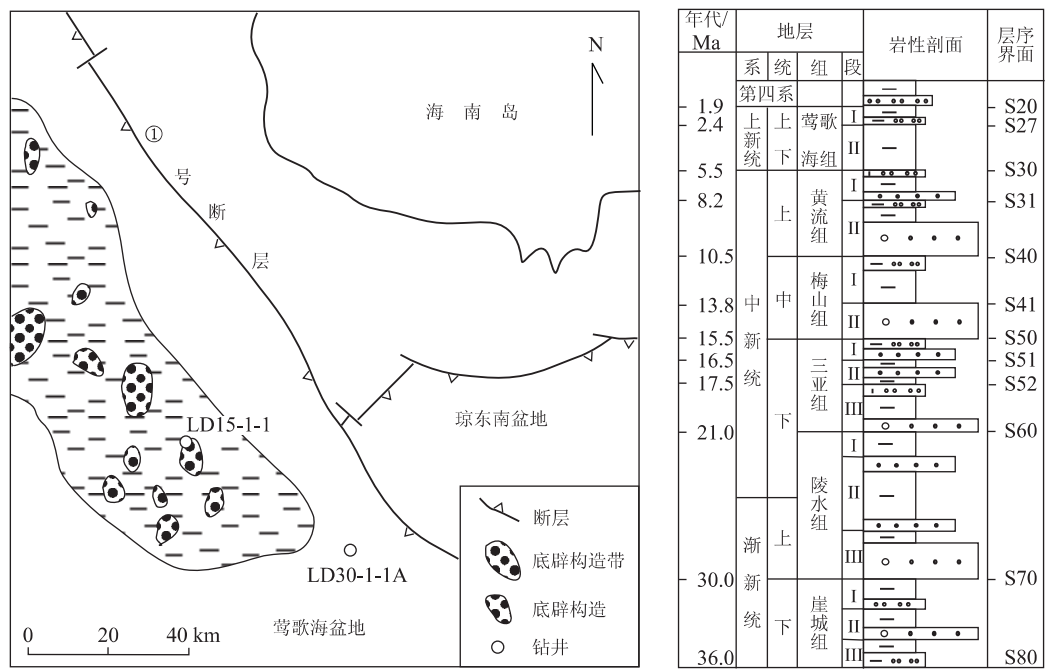


图 1 莺歌海盆地分布及充填序列

Fig. 1 Distribution and filling sequences of the Yinggehai basin

1 地质背景

莺歌海盆地位于我国海南岛与中南半岛之间, 总体走向 NW. 构造上处于欧亚板块东南缘和太平洋板块与印度—澳大利亚板块的交汇地带, 是在古印支板块和欧亚板块拼接的红河断裂带上发育起来的一个新生代沉积盆地, 沉积了巨厚的新生界地层(龚再生等, 1997)(图 1). 尤其是从莺歌海组至第四系盆地接受了数千米厚的海相厚层泥岩夹砂岩沉积(在沉积中心, 沉积速率 0.7~0.86 mm/a), 这是形成该盆地自源型超压的主要原因(解习农等, 1999a). 随着压力的积累, 超压顶界面发育微裂缝, 特别是由于高温下流体的膨胀及烃类的生成, 源岩最终在构造应力的诱导下发生宏观破裂, 以泥—流体底辟的形式释放能量, 形成莺歌海盆地所特有的多期幕式的流体排放区——中央底辟带(解习农等, 1999a; Xie *et al.*, 1999b). 底辟带的地温梯度较高, 为 4.36~4.98 °C/100 m, 而非底辟区地温梯度一般也可达 3.52~5.4 °C/100 m, 且多数大于 4.0 °C/100 m(王振峰和胡代圣, 1999).

按照解习农(2001)对莺歌海盆地超压体系的分类方案, 中央底辟带上所发育的这种由于深部高温超压热流体发生流体压裂而沿着高陡的断裂和裂隙向浅层传递, 在浅层所形成的高于区域背景值的温

压异常, 属于传导型超压, 如 DF1-1-11 井及 LD15-1-1 井的超压顶界面都不到 2 000 m; 而在非底辟区主要由快速沉积引起的压实与排液不平衡、水热增压、新生流体等作用形成的超压体系中, 超压带流体处于封闭状态, 属于自源型超压, 该类型超压顶面埋深多在 3 000 m 以下, 如 LD30—1—1A 井 3 200 以下的 2 个超压异常体就属此类.

2 莺歌海盆地储层物性特征

储层物性一般受沉积作用和成岩作用双重控制. 沉积作用包括沉积环境与粒度、分选性、骨架成分以及填系物成分和含量等岩性特征, 它决定了岩石成岩的初始条件. 在岩石的埋藏成岩过程中, 储层物性主要受成岩作用控制, 具体来说主要是压实、胶结和溶解等作用(Lima and De Ros, 2002). 但是在不同地区, 以上各因素影响的程度是不同的. 而且, 在莺歌海盆地除以上因素外, 其储层物性还受到了高温超压的影响.

2.1 沉积作用对储层物性的影响

沉积作用是影响储层物性的最重要因素, 不同沉积环境下砂体的成分、粒度、分选、泥质含量各异, 其中泥质含量对物性的影响较为明显, 这在 Worden *et al.* (2000) 中已作了较为详尽的论述, 在此不

再赘述.此外,由水动力条件所决定的粒度、分选性等因素对物性的影响也是很明显的,从图 2 中可以看出随粒度的增加、分选性的变好,孔隙度和渗透率都明显增加.由于沉积环境决定了沉积作用的全过程,从而决定了岩石的粒度、分选性、泥质含量等参数,因此表 1 中所示不同环境下储层物性的差别基本可以反映了沉积作用对储层物性的影响:即扇三角洲前缘(HK30-3-1A、LT34-1-1)、浊积体(LT1-1-1A、LD30-1-1A)、扇三角洲平原—前缘等物性较好;三角洲前缘(LT35-1-1、LG20-1-1)、滨

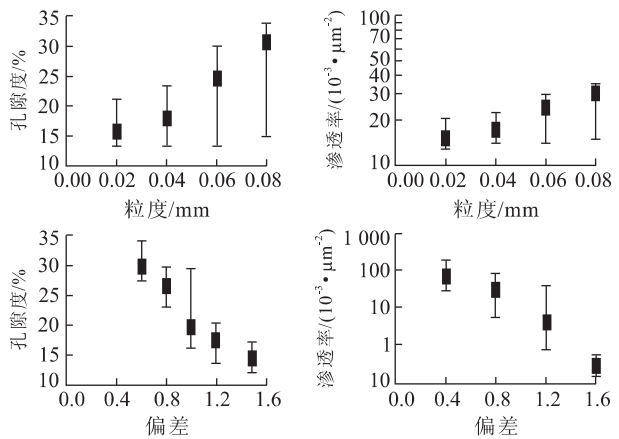


图 2 粒度、分选性与孔隙度、渗透率关系

Fig. 2 Correlation plot between granularity, divagation and porosity, permeability

海砂坝(LG20-1-1)等物性中等;比较差的主要是水深比较大,水动力条件比较弱的环境,例如下临滨(LT1-1-1A).因此从平面展布来看,沉积环境是决定储层物性侧向差异的主要因素.

2.2 成岩作用对储层物性的影响

随着埋深的增加,储层的初始物性将会不同程度地受到成岩作用的改造,其中主要包括使物性变差的压实作用、自生矿物的形成作用以及使物性变好的溶解作用.例如,LT1-1-1 井所揭示的发育于滨海相的含泥砾岩,因为埋深在 3 000 m 以下,使得其物性值并不是很高,就是由于后期的成岩作用改造造成的.

2.2.1 压实作用 压实作用是使岩石孔渗性变坏的最主要因素,它对储层的破坏是惊人的,并且是不可逆的.例如,它可使石英砂岩孔隙度减少 13%~16%,使岩屑砂岩孔隙度减少 28%(姚光庆和李惠生,1991).此外,由于上覆地层的快速沉积,使得孔隙流体来不及排出,形成欠压实,这就是形成自源型超压的最主要原因,而超压的形成有利于保存原生孔隙并产生部分次生孔隙,可以部分改善储层物性.

2.2.2 自生矿物的形成作用 储层中自生矿物的形成作用主要是胶结作用(Chi *et al.*, 2003),其次是交代、蚀变、重结晶作用等.实际上,岩石的成岩演化是在一个封闭系统内的水岩反应,随着温压条件

表 1 不同沉积环境下的碎屑岩物性

Table 1 Clast reservoir qualities in different sedimentary environments

沉积相		扇三角洲前缘河口坝及水下分流河道	扇三角洲前缘	扇三角洲前缘	扇三角洲—平原前缘	三角洲前缘	三角洲前缘	临滨沿岸砂坝	前滨—临滨	下临滨	浅海浊积体
井号		HK30-3-1A	LT34-1-1		LT35-1-1	DF1-1-1	LG20-1-1	LT1-1-1	LT1-1-1A	LT1-1-1A	
井段/m		1 443～1 461	1 647～1 741	1 956～2 200	2 447～2 634	1 403～1 505	2 652～2 660	2 214～2 269	3 101～3 140	2 035～2 092	2 099～2 102
孔隙度/%	最小	16.0	13.7	5.9	5.8	5	12.5	18.5	6.4	很低	2.9
	最大	26.9	25.3	26.7	23.2	37.6	17.3	21.6	14.0		
	平均	23.6	20.2	18.2	16.0	14.1	15.8	20.2	10.0		
渗透率/(10 ⁻³ ·μm ²)	最小	18.6	7.7	0.1	0.1	0.1	8.6	42.7	0.2	很低	232
	最大	747.4	689.4	1 045.4	575.3	726.7	69.96	104	17.4		
	平均	188.7	173.8	217.1	98.1	65.0	36.3	80	3.6		
泥质含量/%	最小	4.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	泥质含量高,10～25	0.0	32	0.0
	最大	19.5	29.5	29.5	29.4	25.5	8.9		26.8	44	3.6
	平均	12.4	8.3	9.1	10.4	10.3	4.1		13.8	38	1.5
岩性		砾岩、砾状或含砾不等粒砂岩夹中—细粒砂岩	含砾中砂岩、砂砾岩	含白垩含砾中砂岩、含白垩砂砾岩	含钙含砾中砂岩、砂砾岩	砂砾岩	极细粒砂岩	粉砂岩、细砂岩、中砂岩等	含泥砂砾岩	泥质粉砂岩、粉砂岩和泥岩	粉砂岩、细砂岩

的改变,不断有岩石颗粒被溶解在孔隙流体中,同时也会形成(或因过饱和而析出)一些矿物,这些自生矿物的形成大大破坏了储层的孔渗性.例如,粘土矿物在向绿泥石及伊利石转化的过程中,它们一般以颗粒衬边形式存在,沿孔壁垂向生长,堵塞孔喉使喉道变窄,造成渗透率的明显下降.自生碳酸盐岩矿物和自生石英、长石充填孔隙,减小原始孔隙度.

从表 2 中可以看出,2 块样品泥质含量、岩性均相似,而胶结物含量差很远,导致两者的孔隙度相差很大.这表明,储层物性与胶结物含量负相关.

2.2.3 溶解作用 在薄片观察过程中可以鉴别出由于储层砂岩溶解作用所产生的次生孔隙,其中主要以铝硅酸盐矿物溶解为主,粒间碳酸盐胶结物溶解较次之,具体来说,它们主要是长石溶孔、粒间溶孔、海绿石溶孔及黑云母溶孔.根据成岩作用阶段分析,碎屑岩在埋藏过程中,当地温达到 80℃左右时,粘土矿物发生层间排水,此时泥岩中成熟的有机质干酪根热演变产生脂肪酸脱羧基作用,分解出有机 CO₂,并产生有机酸. CO₂ 在水中电离成 HCO₃⁻ 及 H₂CO₃,有机酸和无机酸一同进入储层砂岩对其进行溶解改造.有机酸对长石等铝硅酸盐矿物有较强的溶解能力,尤其对长石选择性溶解较为普遍.

表 2 LG20-1-1 井沿岸砂坝岩石学特征					
Table 2 Lithologic characteristics of shore sandstones in LG20-1-1 well					$w_B/\%$
样号	碎屑总量	泥质杂基	胶结物总量	视孔隙率	砂岩粒级
1	74.0	3.0	3.5	19.0	极细—细砂岩
2	65.5	4.5	28.0	1.0	粉砂、细—极细砂岩

3 高温超压对储层物性的影响

3.1 高温对储层物性的影响

较高的地温可以使许多水—岩反应加速,致使在高地温区孔隙度衰减较快.图 3 所示为莺歌海盆地底辟带 DF1-1 构造区(地温梯度为 5.3℃/100 m)与非底辟带的 Ya13-1 构造区(地温梯度为 4℃/100 m)的孔隙度演化对比图,从图中可以清楚地看出,在相同的深度段,高地温区的孔隙度要比低地温区的小得多,而且孔隙度衰减到某一数值所需的深度,在高地温区也要比低地温区浅得多,如在 DF1-1 构造区孔隙度值在 2 600 m 左右时就已减小

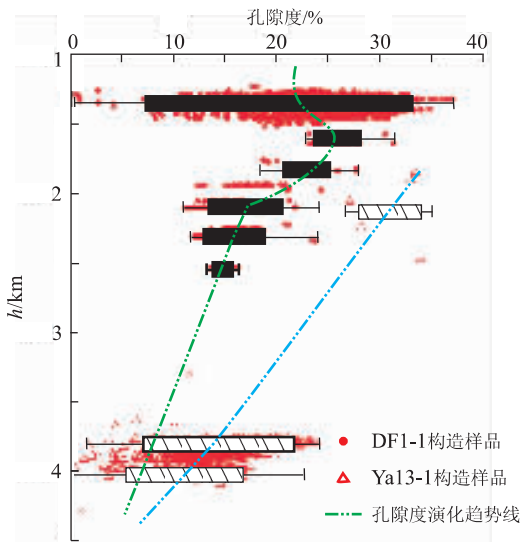


图 3 DF1-1 构造区与 Ya13-1 构造区孔隙度演化对比
Fig. 3 Porosity evolution comparison between DF1-1 and Ya13-1 zones

到了 14%,而在 Ya13-1 构造区 3 700 m 左右深度时孔隙度才减小到该值.此外,从图 3 中 DF1-1 构造区孔隙度演化趋势可以发现其在 1 500~2 000 m 深度段,孔隙度有所增加,这是由于传导型超压所致(后文将作说明),但是超压所改善的孔隙度值仍不足以补偿由于高地温梯度所产生的孔隙度迅速衰减.

3.2 超压对储层物性的影响

异常高压不仅能为油气运移提供动力并封闭油气,而且对油气的生成和储层物性的改善也起到了积极的作用(查明等,2002).它在改善储层物性方面的作用主要体现在对原生孔隙的保存、通过增强溶解作用产生次生孔隙、抑制或阻止自生矿物的形成以及由于流体压裂而产生微裂缝等方面.但是,不同类型的超压,其贡献有所差别.

3.2.1 自源型超压的影响 自源型超压主要是由于快速沉积所造成的压实与排水不平衡形成的,此外,粘土矿物脱水、水热增压、新生流体等也有一定的贡献.它对储层物性的影响是通过影响成岩作用中各水岩反应的反应条件来实现的,具体包括以下三方面:

(1)保存原生孔隙.按照 Scherer(1987)的研究,每超压 50 MPa 约保存 2% 的孔隙度而且自源型超压保存大量原生孔隙的实例在其他超压盆地也是很常见的.这是因为孔隙流体承载了大部分的上覆地层压力,减小了岩石骨架所应承载的压力,减缓了机械压实作用,使部分被超压孔隙流体充填的原生孔

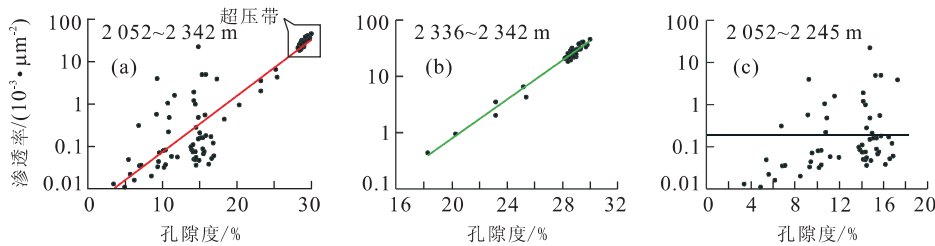


图 4 渗透率与孔隙度关系

Fig. 4 Porosity-permeability plot at different depths of LD15-1-1

隙没有被继续压实而保存到较深的部位。尤其是莺歌海盆地具有较高的地温梯度,而且莺歌海组至第四系的沉积速率又很快,导致了形成超压的时期较早,能够得以保存大量的原生孔隙,使得在 3 200 多米深的储层岩石颗粒还仍以点接触为主。(2)阻止胶结物的形成。根据物理化学反应原理,在异常高压带内,胶结物的增生将变慢或停止,这减少了由于胶结作用而损失的原生孔隙。此外,较高的地温梯度及巨厚海相地层中丰富的有机质的热演化所生成的油气较早地注入,也起到了一定的抑制胶结物生成的作用。(3)形成次生孔隙。由于异常高压对有机质热演化和油气生成的抑制作用,拓宽了生油窗的范围(姜建群等,2000)。并且在有机质热演化成油气过程中,产生大量的有机酸和排出的 CO₂ 水解所形成的无机酸,因此超压增加了酸溶解碳酸盐胶结物的时间和强度,产生大量次生孔隙。况且本区为碱性成岩环境,以碳酸盐矿物的胶结作用为主,这也是溶解作用进行得较彻底的原因,致使 LD30-1-1A 井 3 483.14 m 处薄片中的很多颗粒已被完全溶解(吕明,1999)。

3.2.2 传导型超压的影响 传导型超压除具有以上几种作用外,在其形成过程中,由于区域构造应力和流体压裂的作用,产生大量的微裂缝,这些裂缝对孔隙度的影响虽然不大,但却大大增加了储层的渗透性。通过对 LD15-1-1 井取心段岩心物性的分析表明,在孔隙度较低的某些层段的渗透率仍可达几十毫达西(图 4a)。进一步的分析表明,在现今超压顶界面(2 300 m)以下,孔隙度和渗透率都明显变好,孔隙度为 30%左右,渗透率也较高(图 4b),而在现今超压界面之上古超压界面(约 1 800 m)之下的部分,虽然大部分层段的渗透率集中在 0.1 md 以下,但仍有渗透率为 22 md 的层段(图 4c),这说明虽然流体压力已被释放,大部分微裂缝已闭合,但仍有个别裂缝可能由于在裂缝中生成了一些自生矿物而未

完全封闭。

4 结论

特定的环境决定了特殊的成岩演化过程,导致了储层物性的差异。在对某一储层进行评价时,一方面要静态地评价它现在的性质;另一方面也要用过程观的观点来具体分析它的成因,以便能更好地理解储层性质,进行客观地评价。

莺歌海盆地由于其独特的高温超压环境,致使它的储层成岩演化过程有其与众不同的特点。除沉积作用以及后期的压实作用、自生矿物的形成作用和溶解作用的影响外,较高的地温梯度使得孔隙度衰减很快,并且超压对储层物性也有直接的和通过影响成岩作用所施加的间接的影响。自源型超压体系中,超压主要起到了保存原生孔隙和增强溶解作用而产生一些次生孔隙的作用,在传导型超压体系中,除了以上两种作用外,超压带孔隙流体在压裂突破过程中还产生了大量的裂缝,有效地提高了储层渗透性。

References

Chi, G., Giles, P. S., Williamson, M. A., et al., 2003. Diagenetic history and porosity evolution of Upper Carboniferous sandstones from the Spring Valley #1 well, maritimes basin, Canada—Implications for reservoir development. *Journal of Geochemical Exploration*, 80: 171—191.

Du, X., Zheng, H. Y., Jiao, X. Q., 1995. Abnormal pressure and hydrocarbon accumulation. *Earth Science Frontiers*, 3 (2): 137—147 (in Chinese with English abstract).

Gong, Z. S., Li, S. T., Xie, T. J., et al., 1997. Continental margin basin analysis and hydrocarbon accumulation of the northern South China Sea. Science Press, Beijing (in Chinese).

- Chinese).
- Hunt, J. , 1990. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments. *AAPG Bulletin*, 74(1): 1—12.
- Jiang, J. Q. , Hu, J. W. , Li, M. K. , 2000. Thermal evolution and hydrocarbon generating model of organic matter in high temperature and overpressure setting of Yingqiong basin. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 7(2): 4—7 (in Chinese with English abstract).
- Lima, R. D. , De Ros, L. F. , 2002. The role of depositional setting and diagenesis on the reservoir quality of Devonian sandstones from the Solimoes basin, Brazilian Amazonia. *Marine and Petroleum Geology*, 19: 1047—1071.
- Lü, M. , 1999. Reservoir characteristics of the gas bearing area in Yingqiong basin. *Natural Gas Industry*, 19(1): 20—24 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Q. F. , Chen, S. Z. , Zhang, Q. M. , et al. , 2000. Overpressured basins and hydrocarbon accumulations. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Scherer, M. , 1987. Parameters influencing porosity in sandstone: A model for sandstone porosity prediction. *AAPG Bulletin*, 71(5): 485—491.
- Wang, Z. F. , Hu, D. S. , 1999. Prospecting for giant gas fields in the central mud diapir structure belt in Yinggehai basin. *Natural Gas Industry*, 19(1): 7—11 (in Chinese with English abstract).
- Worden, R. H. , Mayall, M. , Evans, I. J. , 2000. The Effect of Ductile-lithic sand grains and quartz cement on porosity and permeability in Oligocene and Lower Miocene clastics, South China Sea: Prediction of reservoir quality. *AAPG Bulletin*, 84(3): 345—359.
- Xie, X. N. , 2001. Evolution of overpressure systems and hydrocarbon accumulation in Yinggehai basin. The 2nd national sedimentary conference abstracts in 2001, 183 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. N. , Li, S. T. , Hu, X. Y. , et al. , 1999a. Conduit system and formation mechanism of heat fluids in diapiric belt of Yinggehai basin, China. *Science in China (Series D)*, 42(6): 561—571 (in Chinese).
- Xie, X. N. , Li, S. T. , Dong W. L. , et al. , 1999b. Overpressure development and hydrofracturing in the Yinggehai basin, South China Sea. *Journal of Petroleum Geology*, 22(4): 437—454.
- Yao, G. Q. , Li, H. S. , 1991. A preliminary investigation on carbonate cements and their origin in sandstones of Hetaoyuan Formation, Nanyang depression. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 16(5): 549—556 (in Chinese with English abstract).
- Zha, M. , Qu, J. X. , Zhang, W. H. , 2002. The relationship between overpressure and reservoir forming mechanism. *Petroleum Exploration and Development*, 29(1): 19—23 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. X. , Li, J. , Liu, S. Z. , et al. , 2000. The control of abnormal pressure on deep oil/gas pool formation in Qibei sag. *Petroleum Exploration and Development*, 27(5): 19—21 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 杜棚, 郑洪印, 焦秀琼, 1995. 异常压力与油气分布. 地质前缘, 3(2): 137—147.
- 龚再生, 李思田, 谢泰俊, 等, 1997. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集. 北京: 科学出版社.
- 姜建群, 胡建武, 李明葵, 2000. 莺琼盆地高温超压环境有机质热演化及成烃模式探讨. 特种油气藏, 7(2): 4—7.
- 吕明, 1999. 莺琼盆地含气区储层特征. 天然气工业, 19(1): 20—24.
- 马后富, 陈斯忠, 张启明, 等, 2000. 超压盆地与油气分布. 北京: 地质出版社.
- 王振峰, 胡代圣, 1999. 莺歌海盆地中央泥拱构造带大气田勘探方向. 天然气工业, 19(1): 7—11.
- 解习农, 2001. 莺歌海盆地超压体系演化及油气成藏模式. 2001 年全国沉积学大会摘要论文集. 武汉, 183.
- 解习农, 李思田, 胡祥云, 等, 1999a. 莺歌海盆地中央底辟带热流体疏导系统及其成因机制. 中国科学(D 辑), 42(6): 561—571.
- 姚光庆, 李惠生, 1991. 南阳凹陷下第三系核桃源组砂岩中碳酸岩胶结物及其成因的初步探讨. 地球科学——中国地质大学学报, 16(5): 549—556.
- 查明, 曲江秀, 张为海, 2002. 异常超压与油气成藏机理. 石油勘探与开发, 29(1): 19—23.
- 张立新, 李军, 刘淑芝, 等, 2000. 试析歧北凹陷异常压力在深层油气藏成藏过程中的控制作用. 石油勘探与开发, 27(5): 19—21.