

珠江口盆地惠州凹陷泥岩压实特征及其成因

郑丹, 徐思煌, 尚小亮

(中国地质大学 构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为了弄清楚珠江口盆地惠州凹陷新生界地层泥岩压实与油气生成和聚集的关系, 首先探讨了该地区泥岩压实的特征, 并运用最高热解温度和生烃指数等对欠压实的成因进行了讨论。研究表明: 从纵向上来看, 惠州凹陷内发育浅部快速压实段、正常压实段和低幅度欠压实段等3种类型, 浅部快速压实段主要发育在深度小于700 m的万山组和第四系地层, 正常压实段自万山组底部或者粤海组顶部到珠海组底部或者恩平组顶部(1 800~3 200 m), 低幅度欠压实段自恩平组顶部向深部延伸到文昌组(2 400~4 000 m); 从横向上来看, 惠州凹陷划分为东北部和中西部两个具有不同欠压实特征的区域, 东北部欠压实区地层发育珠江组—韩江组和文昌组—恩平组2个低幅度欠压实段, 中西部欠压实区只发育文昌组—恩平组欠压实段; 珠江组—韩江组欠压实段主要由泥质高含量和快速沉积沉降引起, 文昌组—恩平组欠压实段主要由沉积作用、高地热值和生烃作用共同引起, 后者为有效生油段; 惠州凹陷新生界地层砂岩不存在超压。

关键词: 泥岩; 压实作用; 生烃作用; 新生界地层; 惠州凹陷; 珠江口盆地

中图分类号: TE121.1⁺2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2010)04-0372-06

Characteristics and Genesis of Mudstone Compaction in Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin

ZHENG Dan, XU Si-huang, SHANG Xiao-liang

(Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract In order to find out the relationship between the mudstone compaction in Cenozoic Strata and the generation and accumulation of hydrocarbon in Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin, characteristics of mudstone compaction were analyzed, genesis of undercompaction was discussed based on maximum pyrolysis temperature and hydrocarbon generation index. The results showed that three different types of compactions in longitudinal direction were rapid compaction in shallow layer, normal compaction and low amplitude undercompaction, rapid compaction in shallow layer was mainly developed in Wanshan Formation and Pleistocene Strata (less than 700 m), normal compaction was mainly developed from the bottom of Wanshan Formation or the top of Yuehai Formation to the bottom of Zhuhai Formation or the top of Enping Formation (1 800-3 200 m), and low amplitude undercompaction was mainly developed from the top of Enping Formation to Wenchang Formation (2 400-4 000 m); Huizhou Depression was divided into northeast and midwest undercompactions, northeast undercompaction developed two low amplitude undercompactions from Zhujiang Formation to Hanjing Formation and from Wenchang Formation to Enping Formation, midwest undercompaction developed one undercompaction from Wenchang Formation to Enping Formation; the undercompaction from Zhujiang Formation to Hanjing Formation caused by the high content of clay and rapid deposition, and the undercompaction from Wenchang Formation to Enping Formation was active source rock and caused by deposition, high geothermal heat and hydrocarbon generation; there was no overpressure in sandstone of Cenozoic Strata, Huizhou Depression.

Key words: mudstone; compaction; hydrocarbon generation; Cenozoic Strata; Huizhou Depression; Pearl River Mouth Basin

收稿日期: 2010-04-14

基金项目: 国家油气重大专项项目 (2008ZX05023-01)

作者简介: 郑丹(1984), 男, 河南邓州人, 工学硕士研究生, 从事油气地质研究。E-mail: danzheng@sina.com

0 引言

沉积物压实是全球含油气盆地内普遍存在的地质现象^[1]。首先通过对泥岩压实曲线分析,可以掌握泥岩压实的现状并在一定程度上了解其压实历史,推断地下流体压力的分布现状和演化^[2]。其次,通过对砂泥、岩压实曲线匹配程度研究,可以判断现今欠压实带是否具有高压,当存在高压时,还可以用等深度法计算其压力大小^[3]。再次,由压实作用引起的异常高孔隙流体压力是陆相沉积盆地中油气初次运移的主要动力,可以用来分析油气运移的指向^[4]。所以对压实作用研究有利于分析油气初次运移机理、储层孔渗性变化、油气二次运移特征及聚集的资源量等一系列问题^[5]。

珠江口盆地惠州凹陷至今已有 20 多年的勘探历史,凹陷内文昌组和恩平组在沉积时期为多物源供应^[6],以泥质沉积物为主,厚度大、粒度细^[7],有利

于欠压实的发育。但由于该时期区域构造运动强烈,凹陷内断裂十分发育^[8],势必改变沉积物的压实状况及地层压力,从而对油气运移和聚集造成影响。因此,研究惠州凹陷地层压实特征及地层压力的变化,对该区油气勘探和开发都具有重要意义。笔者利用声波时差(Δt_{AC})、地层资料以及最高热解温度(T_{max})等测试资料,对珠江口盆地惠州凹陷泥岩的压实特征及其成因进行了分析,并揭示其与油气的关系,为进一步进行油气勘探服务。

1 研究区地质概况

珠江口盆地是中国南海北部最大的中生代含油气盆地^[9-10],面积约 $1.75 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。研究区惠州凹陷位于珠江口盆地珠一坳陷中部,面积约 $8\ 000 \text{ km}^2$,东西两侧分别与陆丰凹陷和西江凹陷相连,南部为东沙隆起,是珠江口盆地重要的油气富集区(图 1)。

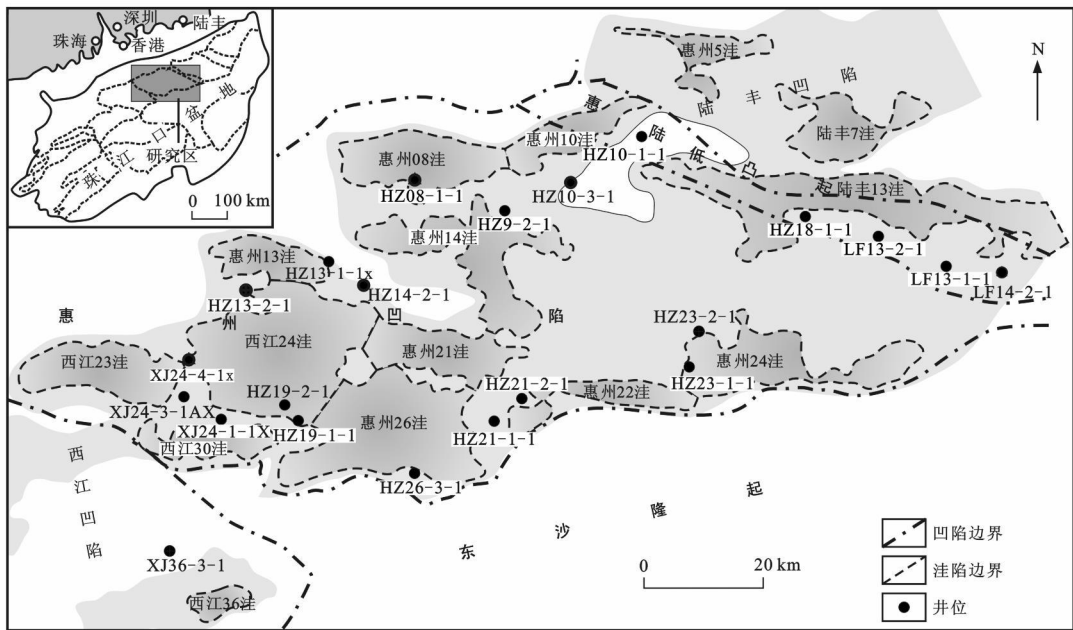


图 1 惠州凹陷各洼陷及井位分布

Fig. 1 Distribution of Different Sags and Position of Wells in Huizhou Depression

惠州凹陷新生界以前古近系变质岩和火山岩为基底,沉积地层厚度一般为 $5\ 000 \text{ m}$ 左右(图 2)。其中古近系为陆相沉积环境,其地层特征为:神狐组为冲积—洪积杂色泥岩、砂岩夹火山碎屑岩沉积;文昌组为湖相泥岩夹砂岩;恩平组为河湖、沼泽和三角洲相砂泥岩夹煤层。随着后期盆地稳定沉降和全球海平面上升,珠海以海陆过渡相砂泥岩沉积为主。新近系以来,全区地层在广泛的海侵环境下形成,珠江组、韩江组、粤海组和万山组主要为海相砂泥岩沉

积。整套新生界地层中,文昌组烃源岩厚度大、类型好、热演化适中,是主力烃源岩;恩平组烃源岩厚度也较大、丰度较高,但演化程度较低,是次要烃源岩。

珠江口盆地新生代构造活动比较强烈,共经历了神狐运动、珠琼运动一幕、珠琼运动二幕、南海运动和东沙运动等 5 次重要的构造运动。构造活动中珠江口盆地新生代褶皱基底发生张裂,北部形成断陷并伴随局部抬升剥蚀、断裂和岩浆活动。尤其是珠琼运动二幕,延续时间最长,抬升剥蚀最强烈,在

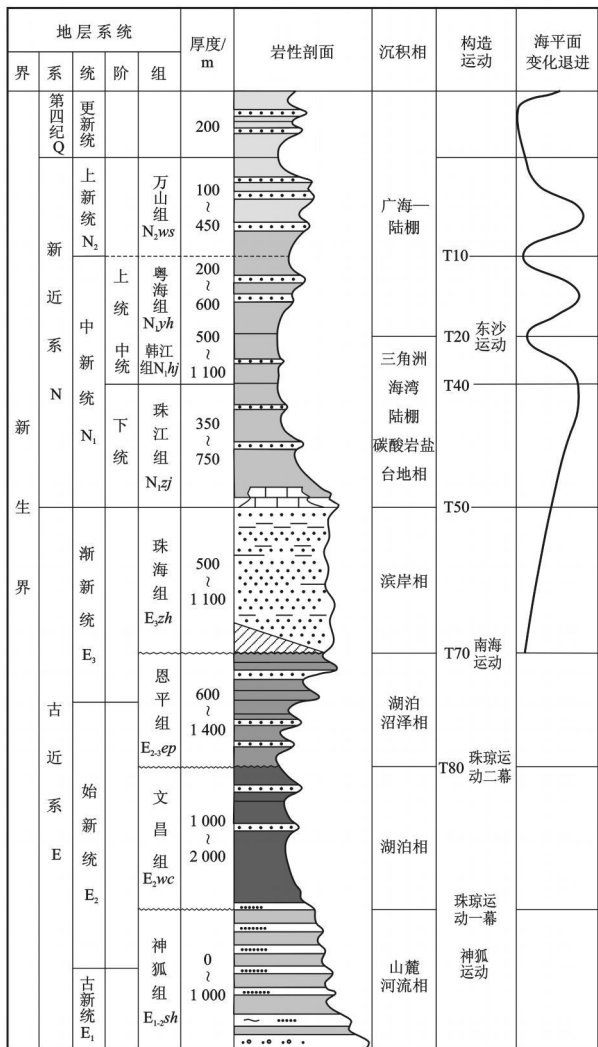


图 2 惠州凹陷新生界地层分布

Fig. 2 Distribution of Cenozoic Strata in Huizhou Depression

盆地隆起区将文昌组剥蚀殆尽, 以致于全部缺失(或仅存很薄)上始新统地层, 是影响盆地发育最主要的运动^[11]。

2 泥岩压实特征

惠州凹陷泥岩的压实特征整体上比较简单, 但不同层位(深度)或相同层位不同区域仍存在一定的差异性, 使得压实存在纵向上分段、横向上分区的特征。

2.1 纵向压实特征

惠州凹陷内各层位的泥岩大致可以划分为 3 种不同压实类型: 浅部快速压实段、正常压实段和低幅度欠压实段。

2.1.1 浅部快速压实段

此段浅层泥岩声波时差值随着埋深加大而快速减小, 在深度-声波时差(对数)散点图上, 该段拟合趋势线表现为有较小的倾斜度。惠州凹陷内泥岩的

浅部快速压实段主要发育在深度小于 700 m 的万山组和第四系地层, 局部可达到粤海组顶部(图 3), 体现了沉积物在埋藏初期被快速压实的过程。

2.1.2 正常压实段

此段深度与声波时差成指数关系, 孔隙度随着深度增加呈有规律的减小, 在深度-声波时差(对数)散点图上表现为具有很好的线性关系。惠州凹陷正常压实段自万山组底部或者粤海组顶部开始, 到珠海组底部或者恩平组顶部结束, 其厚度变化较大, 为 1 800 ~ 3 200 m, 局部洼陷正常压实段内存在小幅度的欠压实, 如 HZ10-1-1 井和 LF13-1-1 井。

2.1.3 低幅度欠压实段

此段随着深度的增加泥岩声波时差正向偏离正常压实趋势线。惠州凹陷欠压实广泛发育, 但其欠压实幅度较低, 其中以发育在珠江组顶部和韩江组底部的欠压实段幅度最小, 接近于正常压实水平, 并且该欠压实段只在局部洼陷出现, 不具有普遍性。而发育在文昌组和恩平组的欠压实段则较为普遍, 而且欠压实幅度也相对明显。该欠压实段大致自恩平组顶部开始出现, 向深部延伸到文昌组, 由于受到地质时期地层抬升剥蚀的影响, 不同洼陷其起始深度变化较大, 为 2 400 ~ 4 000 m(图 3)。

2.2 压实的横向变化特征

平面上, 惠州凹陷内不同洼陷、不同构造部位, 压实特征也存在明显差异。根据其横向变化规律, 可将惠州凹陷划分为东北部和中西部两个具有不同欠压实特征的区域。

惠州凹陷东北部欠压实区主要包括惠州 10 洼和陆丰 13 洼, 该区域发育有 2 个欠压实层段, 即层位较浅的珠江组—韩江组欠压实段以及深部的文昌组—恩平组欠压实段。该区域欠压实出现的幅度都很小, 接近正常压实水平(图 3)。另外由于该区域在始新世和渐新世强烈的剥蚀作用, 使得欠压实出现的深度较浅。

惠州凹陷中西部欠压实区主要包括惠州 08 洼、惠州 13 洼、惠州 23 洼、惠州 26 洼、西江 24 洼, 这些洼陷只有文昌组—恩平组欠压实段, 而在珠江组和韩江组则表现为正常压实。由于该区域在始新世和渐新世剥蚀程度较轻, 文昌组和恩平组地层厚度较东北部厚, 欠压实层段的厚度以及幅度都比东北部大, 总体欠压实段特征较为明显。另外, 该区域欠压实起始深度大, 局部如惠州 13 洼欠压实起始深度可达 4 000 m, 远远大于东北部的惠州 10 洼和陆丰 13 洼(图 3)。

另外, 根据惠州凹陷各洼陷的实测压力数据可

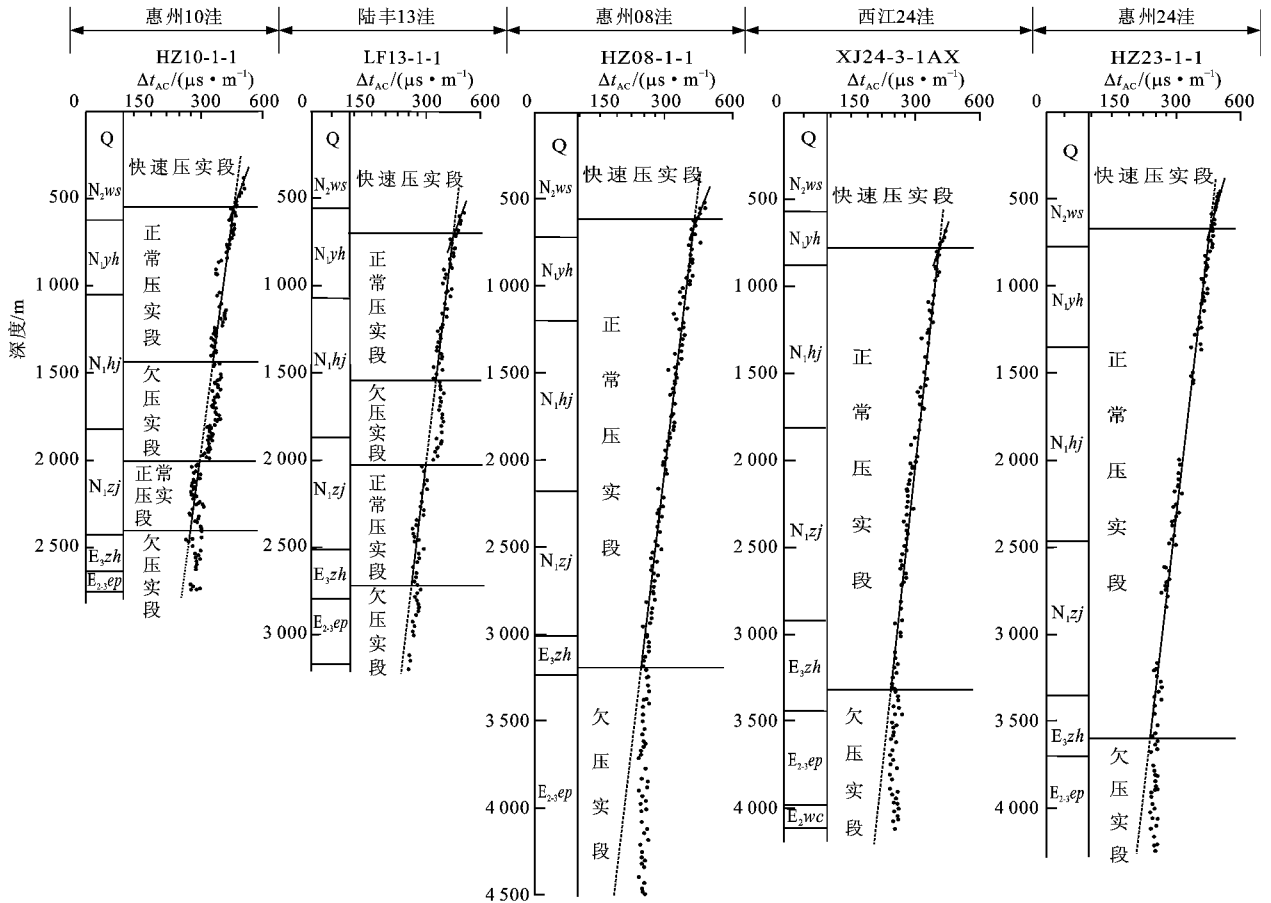


图 3 惠州凹陷各洼陷泥岩深度与声波时差关系

Fig. 3 Relationship Between Depth and Acoustic Time of Mudstone for Different Sags in Huizhou Depression

可以看出(表 1), 无论正常压实段还是欠压实段, 其压力系数都为 0.96 ~ 1.03, 都处于正常压力范围 (0.96 ~ 1.06)^[12], 因此惠州凹陷新生界地层砂岩并不存在超压。

表 1 惠州凹陷各洼陷实测压力

Tab. 1 Pressure of Different Sags in Huizhou Depression

井号	深度/m	层位	压力系数
HZ9-2-1	3 435.8 ~ 3 655.8	珠海组—恩平组	0.98 ~ 0.99
HZ18-1-1	3 099.7 ~ 3 201.7	恩平组	1.01
HZ19-1-1	3 550.0 ~ 3 597.0	珠海组	0.99
HZ21-1-1	2 390.5 ~ 4 481.5	珠江组—恩平组	1.03
HZ26-3-1	3 580.0 ~ 3 628.0	珠海组	0.96 ~ 1.02
XJ24-1-1X	2 523.5 ~ 2 771.0	珠江组	1.01
XJ24-3-1AX	1 884.5 ~ 2 347.5	韩江组—珠江组	1.01 ~ 1.03
LF13-1-1	2 344.0 ~ 2 904.0	珠江组—恩平组	1.01 ~ 1.02

3 泥岩欠压实成因及意义

欠压实是指在压实过程中孔隙流体排出受阻或不能及时排出, 孔隙度不能随埋深相应减少的压实

不平衡状态^[13]。其形成与沉积物的沉积速率、粒度、类型以及后期孔隙流体膨胀等作用有关。一般认为沉积物的沉积速率越大、粒度越小、泥岩含量越高越容易形成不均衡压实, 引起超压并导致欠压实的发生^[14-15]; 生烃作用中, 干酪根热降解会使其密度降低, 孔隙流体的体积增加, 使孔隙压力升高^[16-17], 也有利于欠压实的形成和保持。

3.1 珠江组—韩江组欠压实段成因

惠州凹陷珠江组和韩江组以浅海-三角洲沉积环境为主, 陆丰 13 洼和惠州 10 洼中沉积物的泥岩含量高, 疏导条件差, 不利于流体排出, 为欠压实发育提供了比较好的封闭条件, 使这 2 个洼陷很容易形成欠压实。而惠州凹陷中西部其他洼陷在珠江组和韩江组以砂岩为主, 断层也较陆丰 13 洼和惠州 10 洼发育, 地层的疏导条件好, 不利于欠压实带发育, 因而表现为正常压实。

3.2 文昌组—恩平组欠压实段成因

惠州凹陷恩平组为湖泊沼泽相沉积, 沉积速度最快可达到 383 m/Ma, 以砂泥岩互层为主; 文昌组为湖泊相沉积, 其沉积速度也能够达到 260 m/Ma (表 2),

表 2 惠州凹陷各洼陷沉积速率

Tab. 2 Deposition Rate of Different Sags in Huizhou Depression

洼陷名称及代号		陆丰 13	惠州 08	惠州 10	惠州 13	惠州 14	惠州 21	惠州 22	惠州 24	惠州 26	西江 24
恩平组	最大厚度/m	2 600	1 700	2 100	3 600	2 900	2 000	1 800	2 000	1 600	1 900
(9.4Ma)	沉积速率/(m · Ma ⁻¹)	277	181	223	383	309	213	191	213	170	202
文昌组	最大厚度/m	1 500	2 200	1 900	1 500	1 300	1 100	1 400	1 300	2 500	1 700
(9.6Ma)	沉积速率/(m · Ma ⁻¹)	156	229	198	156	135	115	146	135	260	177

沉积岩性为厚层泥岩夹砂岩。高的泥质含量和较快的沉积速度使这 2 个层段很容易形成欠压实。

另据陈长民等^[18]研究,珠江口盆地大地热流值为 53.7~85.4 mW/m², 平均为 67.7 mW/m²。地温梯度为 (3.2~4.0) °C/100 m, 其中古近系文昌组和恩平组的平均地温梯度可以达到 3.52 °C/100 m。这种较高的地热值所引起的“水热增压”作用能够减小上覆地层的有效应力^[19], 有利于保持较大的孔隙度, 对文昌和恩平组欠压实的形成具有一定促进作用。

此外,惠州凹陷文昌组—恩平组欠压实段与该区主力烃源岩段一致, 生烃作用对该欠压实段的形成也具有一定影响。由于惠州凹陷镜质体反射率(R_o)数据较少, 可以用 T_{max} 来反映有机质的成熟度。两者关系为: 当 $T_{max} < 428$ °C 时, $R_o < 0.5\%$, 有机质处于未成熟阶段; $T_{max} > 428$ °C 时, $R_o > 0.5\%$, 有机质处于成

熟阶段。惠州凹陷各井文昌组—恩平组欠压实段所对应的 T_{max} 都大于 428 °C (图 4), 欠压实段与有机质成熟段完全一致, 说明该欠压实段正处于生烃阶段。

生烃指数可用来表示有机质的热演化程度, 当生烃指数为 0.1~0.3 时表明有机质处于生油阶段, 而且该值越大其演化程度越高^[20]。惠州凹陷文昌组—恩平组欠压实段所对应的生烃指数总体约 0.2 (图 4), 但中西部洼陷要比东北部洼陷略大, 尤其是文昌组, 中西部洼陷有机质的热演化程度要明显高于东北部洼陷。

由此可知,惠州凹陷文昌组—恩平组欠压实段与生烃段一致, 并且其欠压实幅度与有机质热演化程度也能很好吻合, 即凹陷中西部洼陷文昌组和恩平组有机质热演化程度较东北部洼陷大, 其欠压实的幅度也较东北部明显。因此,“生烃增压”有助于

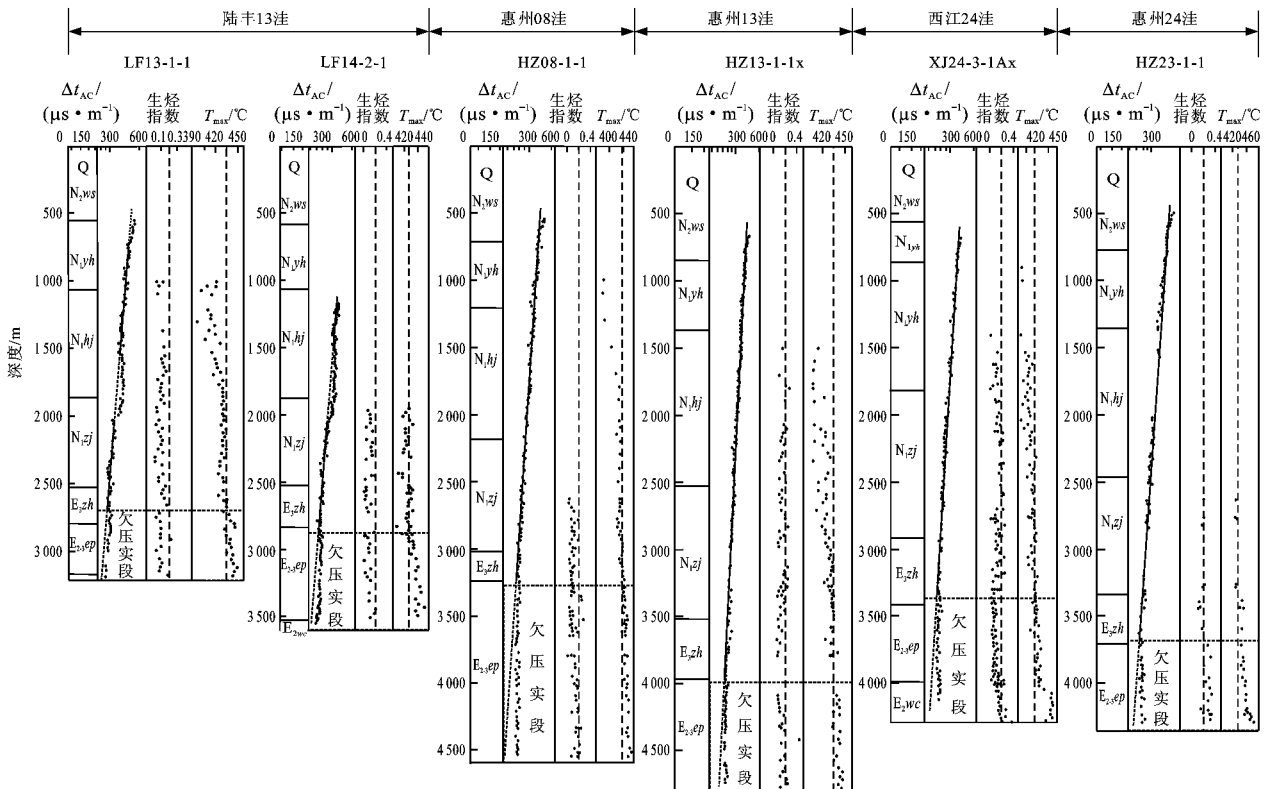


图 4 惠州凹陷泥岩声波时差与有机质热演化剖面

Fig. 4 Profile of Thermal Evolution of Organic Matter and Acoustic Time of Mudstone in Huizhou Depression

惠州凹陷文昌组—恩平组欠压实段的形成。

由于欠压实带的保持时间会大于超压带的保持时间^[5], 在流体排出后短期内, 地层压实状态与地层压力状态并不平衡^[12], 地层仍然会保持较大的孔隙度。惠州凹陷油气运移的高峰期在中中新世, 流体排出后孔隙压力降低, 而压实作用尚未使孔隙度减小, 从而出现欠压实带为静水压力的地质现象。

3.3 欠压实与油气的关系

惠州凹陷欠压实段发育位置与该区的烃源岩段较为一致。文昌组和恩平组欠压实段内, 泥岩的有机碳质量分数为 0 15% ~ 12 07%, 平均 2 21%, R_o 为 0 6% ~ 1 2%, 具有良好的生烃潜力。另外, 只有那些原来具异常高压、后期压力得到释放的生油层, 才是最有效的生油层^[21-22]。惠州凹陷文昌组—恩平组欠压实段在生烃时期会形成异常高的孔隙压力, 当压力聚集到大于泥岩的机械阻抗时, 便会使泥岩产生裂缝, 使得生成的烃类通过微裂缝排替出去^[23-24], 孔隙压力随之减小为静水压力, 因此文昌组—恩平组欠压实段也是该区有效的生油段。正确识别惠州凹陷欠压实带对于认识油气的生成和运移具有重要的理论和实践意义。

4 结语

(1) 惠州凹陷新生界地层中泥岩在纵向上可以划分为 3 种不同的压实类型: 浅部快速压实段、正常压实段和低幅度欠压实段, 其中低幅度欠压实段有 2 个发育层段, 即古近系文昌组—恩平组和新近系珠江组—韩江组。

(2) 横向上可将整个惠州凹陷划分为东北部和中西部两个欠压实区。其中东北部欠压实区有珠江组—韩江组和文昌组—恩平组 2 个低幅度欠压实段, 而中西部欠压实区则只有文昌组—恩平组欠压实段, 但其欠压实幅度较东北部明显。

(3) 惠州凹陷东北部洼陷珠江组—韩江组欠压实主要由沉积物高泥质含量和快速沉积沉降引起, 而整个凹陷内文昌组—恩平组的欠压实段不仅与高泥质含量和快速沉积沉降有关, 较高的地热条件以及生烃作用对其形成也具有一定促进作用。

(4) 惠州凹陷文昌组—恩平组欠压实段与该区烃源岩段相一致。生烃作用使岩层孔隙压力增加, 而后期的排烃作用将过剩压力释放, 因此在欠压实层段砂岩并不存在超压。

参考文献:

[1] 真柄钦次. 压实与流体运移[M]. 陈荷立, 邱世祥, 汤锡元 译.

北京: 石油工业出版社, 1981.

- [2] 陈荷立, 罗晓容. 泥岩压实曲线研究与油气运移条件分析[J]. 石油与天然气地质, 1987, 8(3): 233-242.
- [3] 赵新民, 李国平, 王树寅, 等. 欠压实带与超压带的测井识别[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(1): 63-65.
- [4] 黄永玲, 项希勇. 用地震压力预测技术研究临清拗陷(东部)泥岩压实与油气运移[J]. 复式油气田, 1999(4): 35-38.
- [5] 张博全. 压实与油气勘探中的应用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992.
- [6] 丁琳, 舒誉, 蓝倩, 等. 惠州凹陷古近系恩平组层序地层划分及展布特征[J]. 中国海上油气, 2008, 20(6): 370-372.
- [7] 朱俊章, 施和生, 邓宏文, 等. 珠江口盆地惠州凹陷古近系烃源岩层序地层学和地球化学研究[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(5): 709-714.
- [8] 田鹏, 梅廉夫, 于慧玲, 等. 惠州凹陷断裂特征及其对油气成藏的控制[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(5): 591-594.
- [9] 吴世敏, 周蒂, 丘学林. 南海北部陆缘的构造属性问题[J]. 高校地质学报, 2001, 7(4): 419-426.
- [10] 王存武, 陈红汉, 陈长民, 等. 珠江口盆地深水扇识别和油气成藏关键要素[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2007, 29(3): 12-17.
- [11] 梅廉夫. 珠江口盆地珠一坳陷二级构造带、断层封闭性和输导性研究[R]. 武汉: 中国地质大学, 2007.
- [12] 郝芳. 超压盆地生烃作用动力学与油气成藏机理[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [13] 李明诚. 石油与天然气运移[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.
- [14] 陈发景, 田世澄. 压实与油气运移[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989.
- [15] Vejbaek O V. Disequilibrium Compaction as the Cause for Cretaceous-Paleogene Overpressures in the Danish North Sea [J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(2): 165-180.
- [16] 高德利. 复杂地质条件下深井超深井钻井技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- [17] 徐思煌, 梅廉夫, 袁彩萍. 成烃增压数值模拟[J]. 石油实验地质, 1998, 20(3): 287-291.
- [18] 陈长民, 施和生, 许仕策, 等. 珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [19] 刘池洋. 沉积盆地动力学与盆地成藏(矿)系统[J]. 地球科学与环境学报, 2008, 30(1): 1-23.
- [20] Edward A B, Norman H F. 油气圈闭勘探[M]. 刘德来, 译. 北京: 石油工业出版社, 2006.
- [21] 周国君, 陈发景. 欠压实生油岩中排烃问题的探讨[J]. 现代地质, 1987, 1(增刊): 390-399.
- [22] Magara K. Mechanisms of Natural Fracturing in a Sedimentary Basin[J]. AAPG Bulletin, 1981, 65(1): 123-132.
- [23] Lash G G, Engelder T. An Analysis of Horizontal Microcracking During Catagenesis; Example from the Catskill Delta Complex[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(11): 1433-1449.
- [24] 魏永佩, 张之一. 油气田裂缝密度定量研究方法[J]. 西安地质学院学报, 1991, 13(1): 37-40.