

东海盆地西湖凹陷平湖构造带超压系统与油气成藏

苏奥¹, 杜江民², 贺聪³, 余雁⁴, 王存武⁵, 罗金洋⁶

- (1. 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;
2. 河北地质大学 资源学院, 河北 石家庄, 050031;
3. 甘肃省油气资源研究重点实验室, 中国科学院油气资源研究重点实验室, 甘肃 兰州, 730000;
4. 中国石油华北油田公司 地球物理勘探研究院, 河北 任丘, 062552;
5. 中海油研究总院, 北京, 100027
6. 中国石油华北油田公司 科技信息处, 河北 任丘, 062552)

摘要: 应用流体包裹体分析、盆地模拟和有机地球化学等手段, 研究东海西湖凹陷平湖构造带超压系统与油气成藏的相互关系。研究表明: 平湖构造带油气主要来源于平湖组煤系源岩, 而且油气主成藏期为晚期, 与生烃增压的形成期大致相同, 另外油气藏多分布在超压顶界面附近, 这些均指示超压与油气成藏存在密切关系; 镜质体反射率、地温梯度及包裹体均一温度反映的热异常, 储层物性、非均一捕获的包裹体、“气烟囱”反映的流体压力异常、凝析油轻烃组分反映的组分异常证实研究区流体在超压主导下晚期高效率快速流体; 高压流体的泄压排放诱发断裂开启, 并为流体运移提供动力, 从而控制油气在超压界面附近高效成藏。

关键词: 油气成藏; 超压; 流体流动; 西湖凹陷; 流体包裹体

中图分类号: TE122.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2017)03-0742-09

Overpressure and hydrocarbon accumulation in Pinghu structural belt in Xihu Depression, East China Sea

SU Ao¹, DU Jiangmin², HE Cong³, YU Yan⁴, WANG Cunwu⁵, LUO Jinyang⁶

- (1. Key Lab of Tectonics and Petroleum Resource of Educational Ministry, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;
2. College of Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China;
3. Key Laboratory of Petroleum Resources, Gansu Province/Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
4. Geophysical Exploration Research Institute of PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu 062552, China;
5. CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China;
6. Technological Information Division of PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu 062552, China)

Abstract: The relationship between overpressure and hydrocarbon accumulation was investigated using fluid inclusions, basin simulation and organic geochemistry. The results show that oil-gas in Pinghu structural belt is mainly derived from coal-measure source rocks in Pinghu formation. The main oil-gas accumulation occurred in late stage which is approximately consistent with the forming time of overpressure resulted by hydrocarbon generation. Besides, oil-gas pools are distributed near top overpressured surface. Overpressure is closely linked to hydrocarbon accumulation. The

收稿日期: 2016-03-10; 修回日期: 2016-05-21

基金项目(Foundation item): 国家重大科技专项(2011ZX05023-004-010) (Project(2011ZX05023-004-010) supported by the National Major Project of Science and Technology)

通信作者: 贺聪, 博士研究生, 从事油气地质与地球化学研究; E-mail: hecong2007.ok@163.com

thermal anomaly from vitrinite reflectance, geotemperature gradient and homogenization temperatures of fluid inclusion, abnormal fluid pressure from physical property of reservoir, fluid inclusion with non-homogeneous capture and gas chimney, and abnormal components from light hydrocarbon indicate that efficient rapid fluid flow is controlled by overpressure. The discharging of high-pressure fluids induces opening of faults and provides power of fluid migration.

Key words: hydrocarbon accumulation; overpressure; fluid flow; Xihu depression; fluid inclusion

最近几十年的勘探实践表明, 中国近海盆地都普遍呈现出油气晚期快速成藏的特征。渤海湾盆地渤中凹陷 PL19-3 油田借助地震泵作用实现油气快速幕式成藏, 属于构造主导型控藏^[1-2]。莺歌海盆地则是构造和超压共同为油气幕式成藏提供能量, 属于两者联控成藏^[3-5]。东海盆地西湖凹陷中深地层(>3.5 km)普遍发育强超压^[6], 超压可提供重要的油气成藏动力。此外, 西湖凹陷中浅层龙井组、花港组气苗和“亮点”型地震异常频繁被发现^[7], 可能指示快速充注型油气藏广阔的发育前景。然而, 目前西湖凹陷的超压分布、成因以及与油气成藏的关系尚不明确。为此, 本文作者以东海西湖凹陷平湖构造带为例, 结合该区实际地质背景, 利用流体包裹体定年、盆地数值模拟、有机地球化学和流体包裹体热动力学, 系统研究超压在成藏动力方面控制油气成藏, 以期为今后西湖凹陷勘探提供理论依据。

地^[8]。西湖凹陷(见图 1)位于东海盆地东北部, 面积约 $5.9 \times 10^4 \text{ km}^2$; 迄今为止凹陷陆续发现了平湖、白云亭、武云亭、春晓、残雪、断桥、天外天和八角亭共 8 个油气田及孔雀亭、玉泉、秋月、龙二、龙一和孤山共 6 个含油气构造^[9]。凹陷探明储量巨大, 而探明率仅为 4.5%。西湖凹陷发育新生代沉积, 厚度逾 1 万 m, 发育了古新统、始新统平湖组、渐新世花港组、中新世龙井组、玉泉组和柳浪组以及上新世—第四纪三潭组和东海群。西湖凹陷总体经历了先裂后坳的构造转化^[10], 凹陷基本结构呈东西分带的特征, 由西向东可划分为西部斜坡带、中央洼陷-反转构造带和东部陡坡断隆带 3 个次级构造单元; 平湖构造带是 1 个三级构造单元, 位于西部斜坡带中段, 是凹陷油气勘探与开发的重点区域之一; 构造带总体呈北东向狭长状展布, 自北往南可划分为平北区、平中区及平南区(图 1)。平湖组发育的煤系地层为凹陷主要烃源岩。

1 地质背景

2 实验方法

东海陆架盆地是中国近海面积最大的含油气盆

对所采平湖构造带岩样制成流体包裹体双面抛光

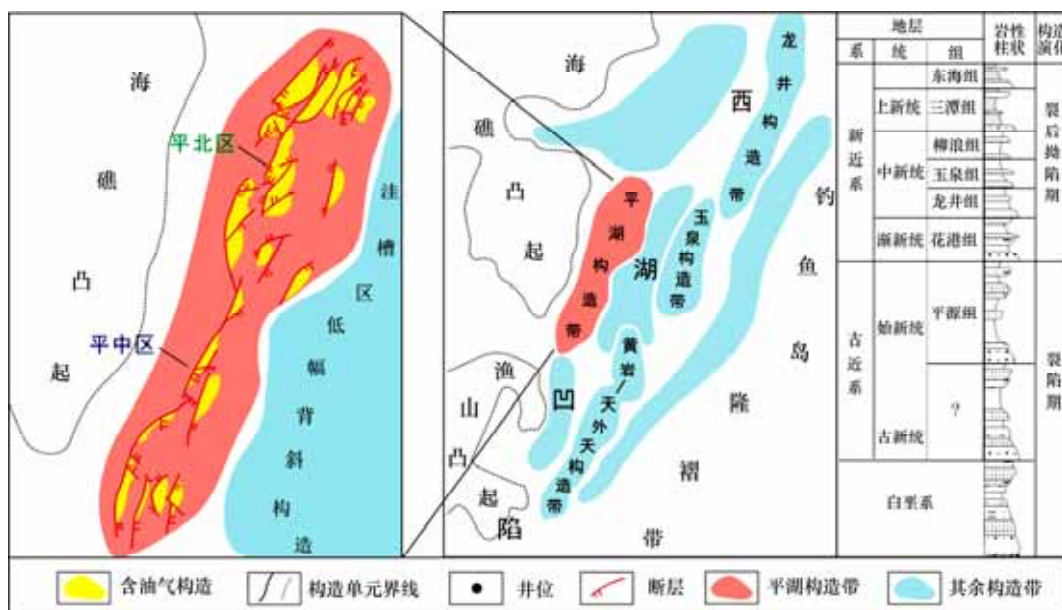


图 1 西湖凹陷平湖构造带构造位置及地层图

Fig. 1 Distribution graph of Pinghu structural belt and strata in Xihu depression

薄片进行测试分析,选取的样品主要分布在花港组和平湖组。其中实验测试仪器为: Nikon 80I 双通道荧光显微镜,紫外线激发波长为 330~380 nm; Maya 2000 Pro 光谱仪记录显微荧光光谱以及英国生产的 Linkam THMS600 液氮型冷热台。测定误差为 0.1 °C。流体包裹体测温方法见文献[11]。选用包裹体形态较好、体积稍大和荧光强度适中的油包裹体估算气液比,结合烃类包裹体和同期盐水包裹体的均一温度,利用美国 CALSEP 开发的 VTFLINC 模拟软件恢复古流体压力。

使用 BasinMod 软件,结合该区测井、钻井、试验分析和实际地质背景等,恢复平湖构造带代表性单井埋藏史、热史以及地层压力史。

3 油气成藏特征

3.1 油气来源

平湖组是西湖凹陷平湖构造带的主力烃源层。目前,油气主要储存在花港组和平湖组。对比花港组原油和平湖组煤系源岩的饱和烃和芳烃碳同位素以及轻烃,发现研究区产出原油同源,且主要来源于中深层平湖组煤系源岩^[12-13]。为了排除成熟度差异影响,平湖组源岩岩样和油样的 C_{27} - C_{28} - C_{29} 甾烷等生物标记化合物相对丰度显示原油为陆源母质生成,且与平湖组煤系源岩具有较好的对比性(图 2),因此,生标组合进一步证实该区花港组原油也均来源于平湖组煤系源岩。

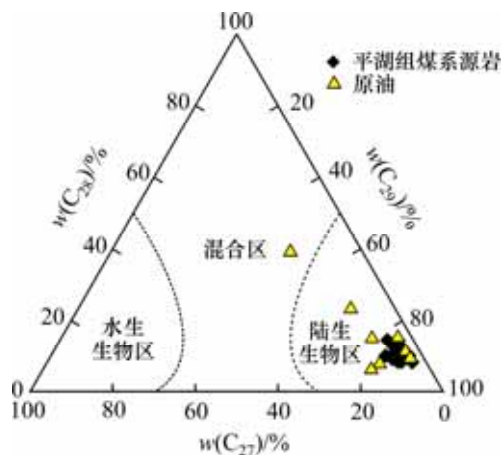


图 2 平湖构造带花港组原油和平湖组煤系源岩 C_{27} - C_{28} - C_{29} 甾烷的三角图

Fig. 2 Triangular plot of C_{27} - C_{28} - C_{29} sterane of oil and coal measures source rocks in Pinghu structural belt

3.2 成藏时间

流体包裹体显微测温测试结果结合埋藏史-热史图能确定油气充注历史^[14]。在透射光下观测流体包裹体薄片,发现流体包裹体主要分布于穿石英颗粒裂纹和石英颗粒内裂纹中,有机包裹体主要类型有气-液两相油包裹体、纯气相包裹体、纯油相包裹体。包裹体形态多为椭圆形、方形、三角形和不规则形,以椭圆形为主。在荧光下油包裹体具有多种荧光颜色,如黄色、蓝绿色和蓝白色。

平湖油气田检测到烃类的 13 块岩样的流体包裹体均一温度显示,中深层平湖组中下段 3 块岩样的流体包裹体均一温度能够正常确定充注时期。而中浅层花港组和平湖组上段 10 块岩样流体包裹体发育的油包裹体数量不仅少,而且油包裹体及同期盐水包裹体的均一温度也大多高于现今地温(最高地温),表现出高温流体快速充注浅层的特征。只能利用油包裹体同期盐水均一温度中最小的温度近似代表流体包裹体被捕获的均一温度,结合埋藏史-热史来确定花港组和平湖组上段油气成藏时期。结果表明中深层平湖组中下段储层有 2 期油气:第 1 期充注小规模黄色荧光低熟油,第 2 期充注天然气、蓝白色荧光和蓝绿色荧光油。结合现今油田产出天然气和原油的品质可知后者为主成藏期。中浅层花港组和平湖组上段油气充注时期很晚而且晚于中深层,主成藏期为晚期,即具有晚期成藏的特点(图 3)。

砂岩颗粒表面及颗粒间孔隙中油浸荧光相结合含油包裹体颗粒指数(I_{G0})能够在一定程度上提供油气充

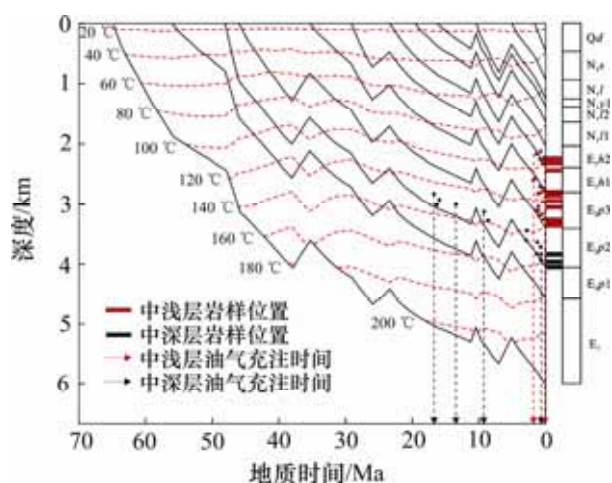
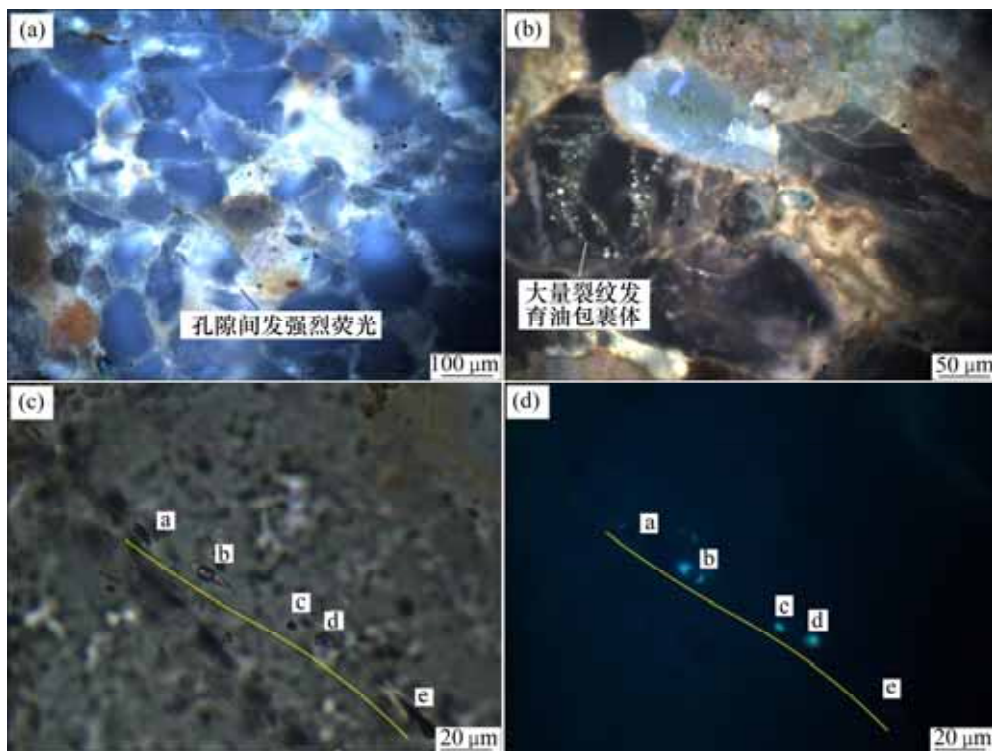


图 3 平湖油气田地温与流体包裹体均一温度对比及其充注历史

Fig. 3 Contrast of geo-temperature and homogenization temperature of fluid inclusions and filling history in pinghu oil and gas field



图中, a, b, c, d 和 e 代表油包裹体。

- (a) W1 井, 3.594 1 km, 砂岩颗粒边缘及表面发强烈荧光, $I_{GO} < 1\%$; (b) B3 井, 4.187 8 km, 石英颗粒裂纹中发育大量油包裹体, $I_{GO} > 5\%$; (c) 透色光, B3 井, 4.190 0 km, 穿石英颗粒裂纹发育油包裹体群, 包裹体气液比变化较大;
(d) 荧光, B3 井, 4.190 0 km, 穿石英颗粒裂纹发育油包裹体群, 包裹体气液比变化较大

图 4 西湖凹陷平湖构造带部分井储层显微薄片照片

Fig. 4 Micro-photos of reservoir sandstone of in Pinghu structural belt in Xihu sag

注成藏的信息^[15]。所采样品的荧光相显示中浅层油气藏储层较少发育油包裹体, 而大部分样品砂岩的颗粒边缘孔隙发较强蓝白荧光, 表明油气充注时间较晚, 成岩作用趋近于停止, 油包裹体被较少捕获。如 W1 井所采 3.594 1 km 的油浸染砂岩发现极少量蓝白色油包裹体(I_{GO} 远小于 1%), 而颗粒边缘孔隙荧光强烈(图 4(a))。

4 超压与油气成藏

西湖凹陷平湖构造带超压顶界面存在一定起伏, 平中区超压顶界面发育深度较浅, 主要在花港组下段, 而平北区超压顶界面发育较深, 主要在平湖组中上段(图 5), 而且油气多在超压顶界面附近聚集成藏^[6], 超压面以上多为油藏, 超压面以下多为气藏, 呈现“上油下气”的垂向分布特征^[16]。

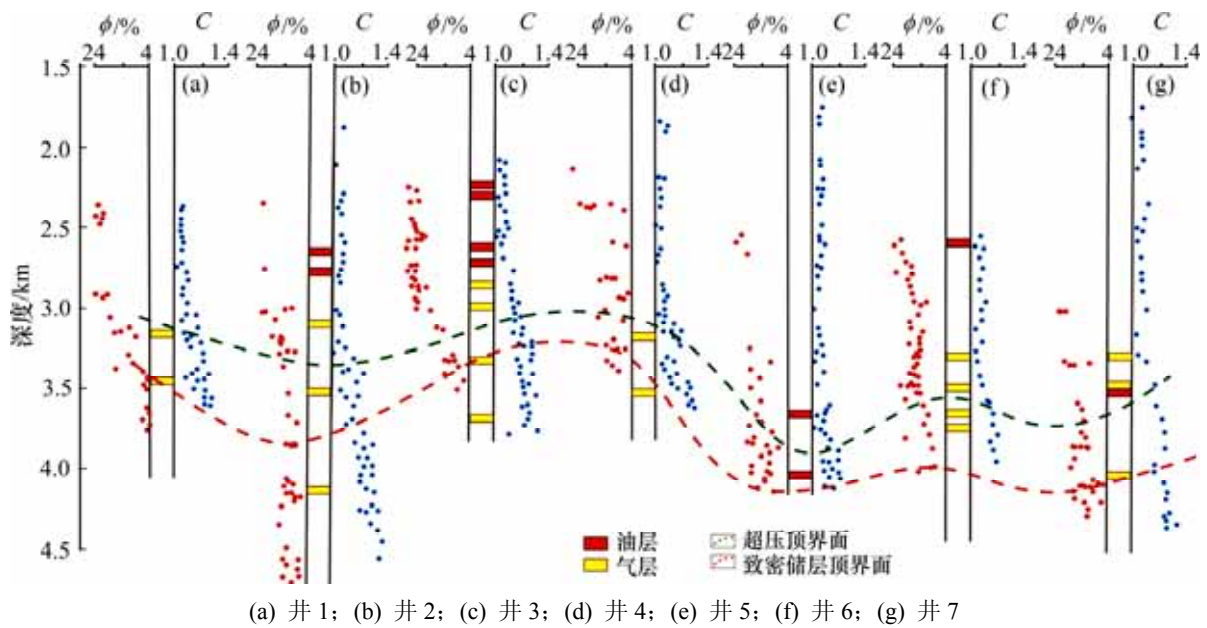
4.1 超压系统

按照压力界线划分标准^[17], 西湖凹陷平湖构造带具有 2 个压力系统: 中浅地层压力系数多小于 1.2, 为

常压系统; 而中深地层则普遍发育超压, 目前实测最大压力系数达 1.8, 而且具有有效的超压封闭层。超压顶界面深度小于储层致密化深度, 且顶界面上下多有含气层(图 5, 其中, ϕ 为孔隙度, C 为泥浆压力系数), 这表明超压封闭层主要封闭机理并非是致密储层的物性封闭而是流体封闭, 即由富含天然气的粗细粒沉积岩互层形成的毛细管力构成一个无形动态分隔层, 这与 Anadarko 盆地奥陶系静态超压长期保存的成岩封闭层有明显差异^[18]。中深超压地层在有效的气毛细管封闭作用下, 形成了 1 个压力封闭箱。

4.2 压力演化

盆地模拟和流体包裹体热动力学模拟是目前重建地层古压力有效手段^[19]。据油包裹体与同期盐水包裹体均一温度以及油包裹体气液比, 可利用包裹体热动力学模拟法恢复古压力。同期盐水包裹体均一温度线与等容线的交点即为捕获的最小压力。结合古埋藏深度便可得到对应的剩余压力。综合盆地模拟、包裹体热动力学模拟以及实测 DST 压力相互约束分析得到研究区不同历史时期地层剩余压力演化规律。图 6 所示为平湖组中段地层压力演化特征。从图 6 可见: 35.4



(a) 井 1; (b) 井 2; (c) 井 3; (d) 井 4; (e) 井 5; (f) 井 6; (g) 井 7
 图 5 平湖构造带 7 口井的超压顶界面、致密储层顶界面以及油气层深度

Fig. 5 Interface of overpressure and dense, depth of oil and gas reservoir of 7 Wells in Pinghu structural belt

地层	E ₂ p	间断	E ₃ h	间断	N ₁ ¹ l	N ₁ ² y	N ₁ ³ l	间断	N ₂ s	Q
构造演化	裂陷期		坳陷期					沉降期		

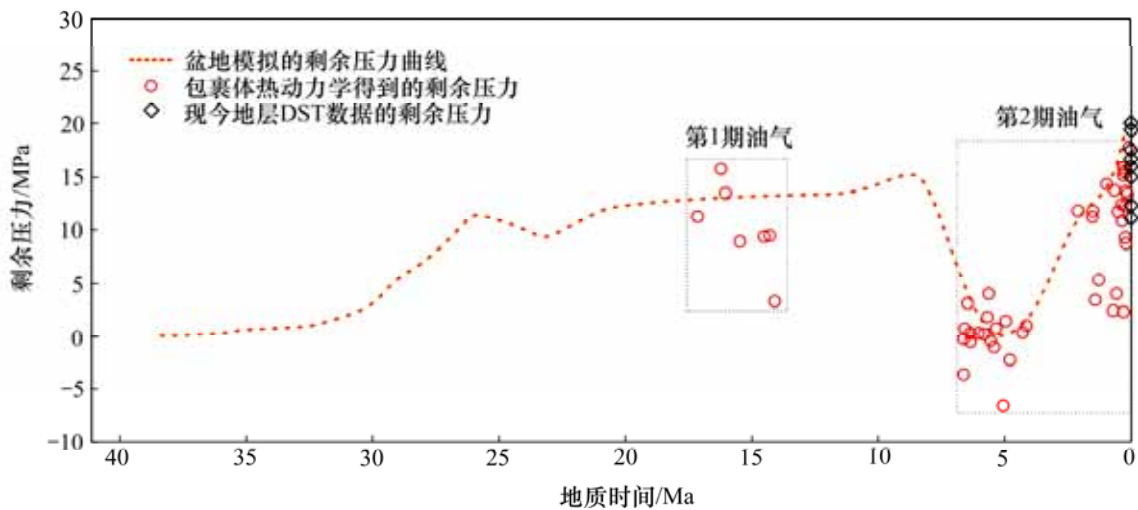


图 6 西湖凹陷平湖构造带平湖组中段压力随时间的演化关系

Fig. 6 Evolution relationship between pressure and time in the middle of Pinghu group in Pinghu structural belt

Ma 后地层逐渐发育超压, 到花港运动期间(26.0 Ma) 发生小幅度降压, 之后地层逐渐平缓增压; 到龙井运动期间(7.0 Ma)地层发生大规模抬升, 地层之前积累的超压被释放形成常压—弱超压系统, 之后又开始逐渐增压直至现在, 形成中—强超压系统。

4.3 超压成因

西湖凹陷平湖组 and 花港组沉积速率快, 相对早期超压为压实不均衡形成。随后中新世末(距今 7.0~5.2 Ma)龙井运动造成构造抬升而泄压。新构造运动期间

(距今 0~5.2 Ma)又迅速沉降, 沉降速率大于 200 m/Ma, 导致地层迅速增温加快平湖组煤系源岩熟化(镜质体反射率 R_0 净增大 0.3%), 进入中等成熟—高成熟阶段大量生油气, 可能是地层增压的主要机制。研究区代表性单井的测井曲线表明: 泥岩声波时差随着深度增加逐渐偏离正常的演化趋势线, 而密度随深度则顺着趋势线到逐渐增加极限值, 之后基本保持不变, 表现出烃类增压的特征(图 7(a)和图 7(b))。此外, 源岩的地球化学指标如 w (氯仿沥青“ A ”)、奇偶优势比、碳优

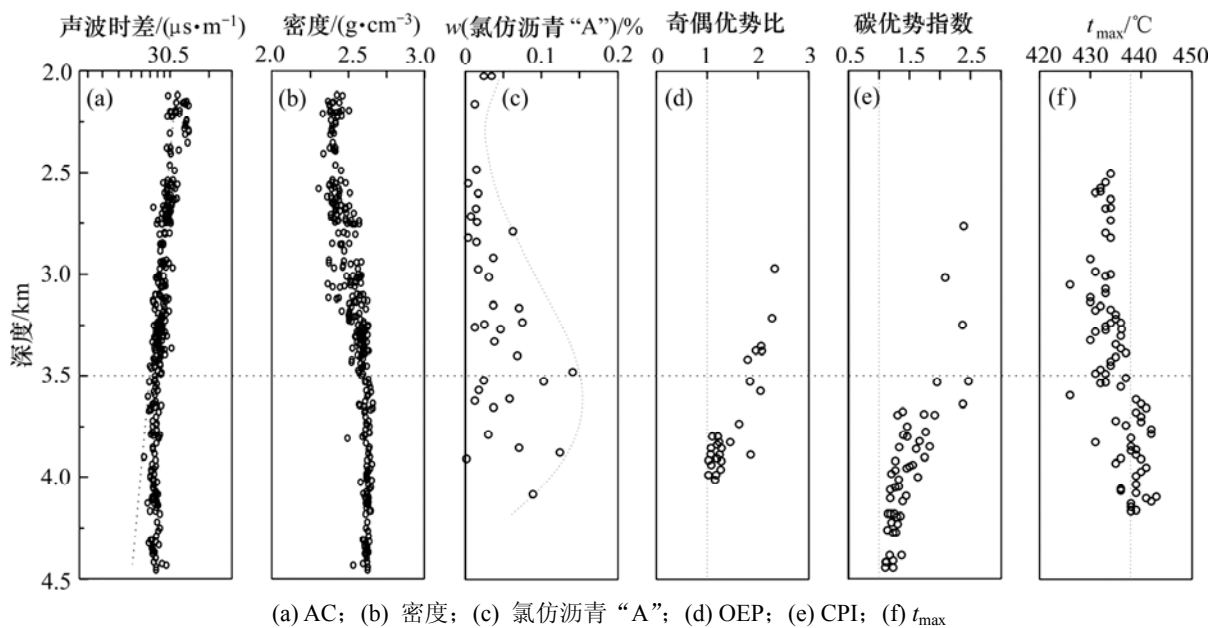


图7 西湖凹陷平湖构造带P1井泥岩声波时差、密度和地球化学参数与深度关系图

Fig. 7 Relationship between AC, density, geochemical parameters of mudstone and depth in Pinghu structural belt

势指数和 t_{\max} 均指示烃类生排高峰的深度段与超压顶界面吻合(图 7(c)~(f)), 表明油气生成对该区超压形成有重要贡献。

4.4 超压控制下的流体流动

上述油源对比显示平湖构造带油气主要来源于平湖组煤系源岩, 流体包裹体显示油气主成藏期对应生烃增压的形成期, 且目前油气藏多分布在超压顶界面附近, 这些均表明超压与油气成藏存在密切关系。与欠压实带来的高风险勘探不同, 生烃作为超压来源既提供了油气来源, 又提供了油气运移动力, 是勘探的有利因素。平湖构造带在古新一始新世断陷期发育了众多 NE-NNE 向正断层, 构成了“阶梯式”同生断裂群, 沟通了下部古新统与始新统源岩, 形成垂向输导通道, 如平湖主断裂、放一和放二断裂^[20]。渐新世一中新世坳陷期形成的 NNE 向压性逆断层构成了油气垂向运移至龙井组、花港组的通道。晚期在新构造运动作用下, 在一定程度上活化了前期断裂, 不仅降低了断裂开启的压力门限, 而且形成了正逆组合的复式断裂输导体系, 使得下部油气能够凭此优势通道运移至上部聚集成藏, 这大大提高了油气运移效率, 使得晚期成藏存在可能。如 SMITH^[21] 的研究表明流体沿活动断裂的运移效率是稳态流体的 3 000~5 000 倍, 使得储层短期内也能聚集成藏。

油气能够在超压顶界面附近快速成藏(主要是花港组和平湖组上段油气藏), 原因在于油气能够沿断裂带发生高效穿层运移。从图 4(b)可看出在超压顶界面

附近且靠近断裂的砂岩石英颗粒发育了众多纵横交错的裂纹, 并且发育较多油包裹体。研究区有众多沟通深部源岩与中浅层的断裂, 同时天然气碳同位素、甲烷含量和 $V_m(iC_4)/V_m(nC_4)$ (V_m 为气体摩尔体积) 的垂向变化规律指示了天然气垂向运移特征^[22], 这些都从侧面证明了油气沿断裂垂向运移, 而超压封闭箱开启则为其提供能量基础。以超压为主导的流体流动往往也具有快速充注的特点, 可引起热异常、压力异常和组分异常等响应。

4.4.1 热异常

超压深层热流体快速充注浅层, 流体温度要高于周围地层温度, 往往造成地层某些受温度影响较大的指标出现热异常。

1) 镜质体反射率和地温梯度异常。随着深度增加, 该区各井在 3.5~4.2 km 的深度段内其镜质体反射率 R_o 变化普遍接近于 0, 但在 4.2 km 后又恢复正常的变化趋势(图 8(b)), 这并非超压的抑制作用导致, 而是地温变化率接近于 0 引起(图 8(c))。这可能是在超压和构造应力作用下, 地层流体破裂或断裂系统频繁开启, 超压流体周期性排放、垂向运移的结果^[23]。不稳定的超压环境和有机质热演化产物的排出也证明超压对有机质热演化未产生明显抑制作用。

2) 包裹体均一温度。深部热流体快速充注于中浅层, 流体包裹体被捕获时的温度时往往要高于当时的地层温度, 因此, 油包裹体以及盐水包裹体的均一温度表现出异常高的特征。平湖油气田中浅层花港组和

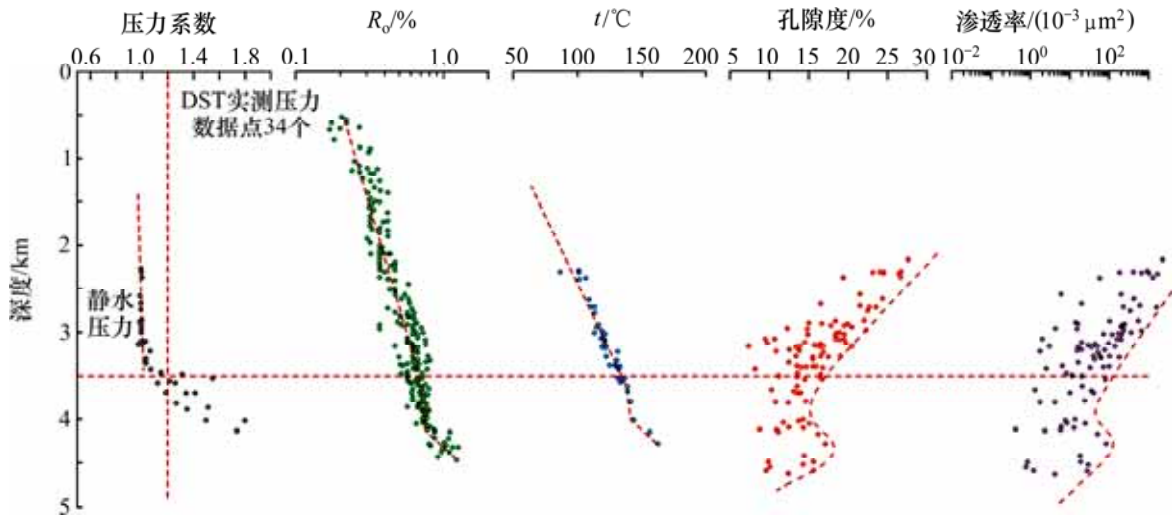


图 8 平湖构造带压力系数、镜质体反射率、地温、孔隙度和渗透率与深度的关系

Fig. 8 Relationship among depth and pressure coefficient, R_0 , formation temperature, porosity and permeability in Pinghu structural belt

平湖组上段流体包裹体均一温度明显高于最高地温，明显是热流体穿层充注所致。

4.4.2 压力特征异常

压力封闭箱周期排放泄压，导致地层某些受压力条件变化而影响较大的指标出现异常。

1) 储层物性异常。从图 8(d)和图 8(e)可看出：随着深度增加，压力逐渐变大。高压有效地降低了骨架颗粒所承受的压力和抑制胶结作用的发生，导致孔隙度与渗透率减小的趋势被减缓。稳定的压力封闭箱内储层处于封闭的环境中，流体无法活动则难以溶蚀储层。但该区储层物性逐渐出现明显改善的现象，原因可能在于存在频繁的超压积累与排放，引起流体反复流动淋滤储层。

2) 非均一捕获的包裹体。在超压环境中由于附近断裂开启，压力突然改变，原本单一液相流体分离为两相甚至三相性质不同的流体，此时被成岩矿物捕获便形成非均一捕获的包裹体群。观察断层附近岩样的流体包裹体岩相发现，穿石英颗粒裂纹中油包裹体呈同一产状，但气液比(即包裹体的气泡与液体的面积比)变化较大(图 4(c)和 4(d))。图 4(a)所示包裹体几乎全为纯气相包裹体，而图 4(b)和图 4(c)所示包裹体属于富气相包裹体。图 4(d)所示包裹体的气泡则较小，因此，属于非均一捕获的烃类包裹体，经推测可能是断裂开启导致压力突降造成的组分不均匀分馏，反映了泄压时流体活动特征。

3) “气烟囱”现象。地震剖面有着明显的“气烟囱”构造，而且存在地震振幅较弱、相位下拉和顶部

呈“穹顶状”的现象(图 9)。这些都较符合气体泄流通道的特征^[24]，反映了该区超压沿着断裂破碎带泄压，气体或流体沿着断裂通道垂向上涌的过程。这是超压作用下流体通过断裂带发生快速充注的有利证据。

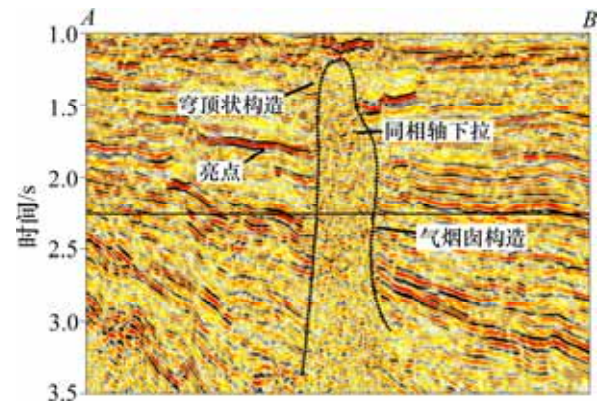


图 9 西湖凹陷某地震剖面的“气烟囱”构造

Fig. 9 “Gas chimney” structure in Xihu depression

4.4.3 凝析油轻烃组分异常

THOMPSON^[25]通过在密闭容器中的原油注入天然气然后减压除去气相，提出了凝析油形成的“蒸发分馏”模式，并发现实验次数越多，原油的甲苯与正庚烷(nC_7)质量比即 $m(\text{甲苯})/m(nC_7)$ 会越大(图 10)。研究区油样轻烃组分测试结果表明：凝析油的($m(\text{甲苯})/m(nC_7)$)具有较大的变化范围(0.04~7.15)，这反映了实际地质情况下气侵原油并运移聚集时其温压条件频繁变化，体现了该区流体不连续流动的特征，而且也

指示该区存在多次油气分异, 表现出非稳态的油气幕式充注特点。

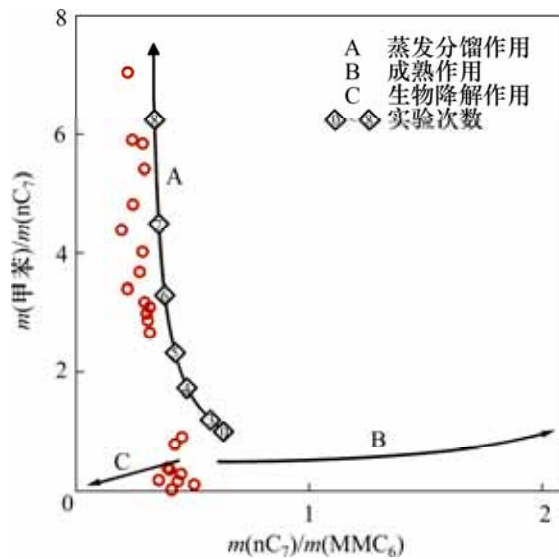


图 10 平湖构造带凝析油的 $m(\text{甲苯})/m(\text{nC}_7)$ 与 $m(\text{nC}_7)/m(\text{MMC}_6)$ 的关系

Fig. 10 Relationship of toluene/n-heptane and n-heptane/methyl cyclohexane of condensates in Pinghu structural belt

综上所述: 超压成因决定了西湖凹陷平湖构造带油气晚期快速成藏模式; 龙井运动之后, 上新世和第四纪时期地层快速沉降, 平湖组源岩快速熟化, 烃类大量生成, 流体封闭和压力积累形成了超压封闭箱; 对于在超压顶面以下处于高压强的能量系统, 其箱内高压积累到一定值后便可能沿着断裂泄压, “箱内外”周期变化的压差导致油气充注通道幕式开启, 并为流体顺断层或破裂面运移提供动力, 导致油气在晚期快速充注在超压顶面之上龙井组、花港组和平湖组上段成藏。因此, 勘探时应了解关键成藏期时地层古压力以及其演化特征, 寻找超压顶面隆起点和断裂附近具有良好保存条件的油气有利聚集区(背斜、断块), 重点在于断层封闭性和盖层质量评价。今后西湖凹陷的油气勘探主要对象除中深层领域非常规低渗致密气藏外, 还可兼找超压为成藏动力的泄压充注型油气藏。

5 结论

1) 平湖构造带油气主要来源于平湖组煤系源岩, 而且油气主成藏期对应生烃增压的形成期。油气藏多分布在超压顶界面附近。这些均表明超压与油气成藏

存在密切关系。

2) 平中区超压顶界面多发育在花港组, 平北区超压顶界面相对较深, 多发育在平湖组中上段, 中深地层普遍发育超压, 并且有良好的气毛细管封闭压力分隔层。恢复的平湖组中段地层古压力演化史表明 0~38 Ma 期间发育了 2 期超压: 第 1 期超压成因主要为欠压实, 第 2 期超压成因主要为生烃。

3) 镜质体反射率和地温梯度及包裹体均一温度反映了流体热异常, 储层物性、非均一捕获的包裹体、“气烟囱”反映了压力异常, 凝析油轻烃组分反映了组分异常, 这些均证明以超压为主导的流体快速充注。晚期超压成因控制了平湖构造带油气晚期快速成藏。超压诱发断裂开启, 并提供运移动力, 使得深部流体快速充注于中浅层。因此, 断裂和超压顶界面隆起点附近具有良好保存条件的圈闭是该类油气勘探的有利目标。

参考文献:

- [1] 邹华耀, 龚再升, 滕长宇, 等. 渤中坳陷新构造运动断裂活动带 PL19-3 大型油田晚期快速成藏[J]. 中国科学:地球科学, 2011, 41(4): 482-492.
ZOU Huayao, GONG Zaishen, TEN Changyu, et al. Late-stage rapid accumulation of the pl19-3 giant oilfield in an active fault zone during Neotectonism in the Bozhong depression, Bohai bay[J]. Science China Earth Sciences, 2011, 41(4): 482-492.
- [2] 徐长贵. 渤海走滑转换带及其对大中型油气田形成的控制作用[J]. 地球科学, 2016, 41(9): 1548-1560.
XU Changgui. Strike-slip transfer zone and its control on formation of medium and large sized oilfields in Bohai Sea area[J]. Earth Science, 2016, 41(9): 1548-1560.
- [3] 徐辉龙, 丘学林, 孙金龙. 莺歌海盆地新构造运动与超压体系喷溢油气成藏作用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(3): 93-100.
XU Huilong, QIU Xuelin, SUN Jinlong. Neotectonics and the accumulation of oil and gas attributed to the expulsion activity of geopressured system in the Yinggehai Basin[J]. Marine Geology & Tertiary Geology, 2006, 26(3): 93-100.
- [4] 段威, 罗程飞, 刘建章, 等. 莺歌海盆地 LD 区块地层超压对储层成岩作用的影响及其地质意义[J]. 地球科学, 2015, 40(9): 1517-1528.
DUAN Wei, LUO Chengfei, LIU Jianzhang, et al. Effect of overpressure formation on reservoir diagenesis and its geological significance to LD block of Yinggehai Basin[J]. Earth Science, 2015, 40(9): 1517-1528.
- [5] 黄银涛, 姚光庆, 周锋德. 莺歌海盆地黄流组浅海重力流砂体物源分析及油气地质意义[J]. 地球科学, 2016, 41(9): 1526-1538.
HUANG Yingtiao, YAO Guangqing, ZHOU Fengde. Provenance analysis and petroleum geological significance of shallow

- marine gravity flow sandstone for Huangliu formation of Dongfang area in Yinggehai Basin, the South China Sea[J]. *Earth Science*, 2016, 41(9): 1526–1538.
- [6] 张国华. 西湖凹陷高压形成机制及其对油气成藏的影响[J]. *中国海上油气*, 2013, 25(2): 1–8.
ZHANG Guohua. Origin mechanism of high formation pressure and its influence on hydrocarbon accumulation in Xihu sag[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2013, 25(2): 1–8.
- [7] 熊斌辉, 张喜林, 张锦伟, 等. 西湖凹陷油气成藏的主控因素[J]. *海洋石油*, 2008, 28(2): 14–24.
XIONG Binhui, ZHANG Xilin, ZHANG Jinwei. The key factor controlling hydrocarbon accumulation in Xihu Depression[J]. *Offshore Oil*, 2008, 28(2): 14–24.
- [8] 田杨, 叶加仁, 雷闯, 等. 东海陆架盆地丽水—椒江凹陷月桂峰组烃源岩发育控制因素及形成模式[J]. *地球科学*, 2016, 41(9): 1561–1571.
TIAN Yang, YE Jiaren, LEI Chuang, et al. Development controlling factors and forming model for source rock of Yueguifeng formation in Lishui—Jiaojiang Sag, the East China sea continental shelf basin[J]. *Earth Science*, 2016, 41(9): 1561–1571.
- [9] 苏奥, 陈红汉. 东海盆地西湖凹陷油岩地球化学特征及原油成因来源[J]. *地球科学*, 2015, 40(6): 1072–1082.
SU Ao, CHEN Honghan. Geochemical characteristics of oil and source rock, origin and genesis of oil in Xihu depression, East China Sea Basin[J]. *Earth Science*, 2015, 40(6): 1072–1082.
- [10] 赵志刚, 王鹏, 祁鹏, 等. 东海盆地形成的区域地质背景与构造演化特征[J]. *地球科学*, 2016, 41(3): 546–554.
ZHAO Zhigang, WANG Peng, QI Peng, et al. Regional background and tectonic evolution of East China Sea Basin[J]. *Earth Science*, 2016, 41(3): 546–554.
- [11] GOLDSTEIN R H, REYNOLDS T J. Systematics of fluid inclusions in the diagenetic mineral[M]. *SEPM Short Course 31*, 1994: 1–85.
- [12] 苏奥, 陈红汉, 王存武, 等. 东海盆地西湖凹陷油气成因及成熟度判别[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(5): 521–527.
SU Ao, CHEN Honghan, WANG Cunwu, et al. Genesis and maturity identification of oil and gas in the Xihu Sag, East China Sea Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(5): 521–527.
- [13] 贾健谊, 须雪豪, 孙伯强. 东海西湖凹陷原油与天然气的地球化学特征[J]. *海洋石油*, 2000(2): 1–7.
JIA Jianyi, XU Xuehao, SUN Boqiang. Oil/gas geochemical characteristics in the Xihu sag of the East China Sea[J]. *Offshore Oil*, 2000(2): 1–7.
- [14] 刘妍鹤, 陈红汉, 苏奥, 等. 从含油气检测来洞悉琼东南盆地东部发育始新统烃源岩的可能性[J]. *地球科学*, 2016, 41(9): 1539–1547.
LIU Yanhua, CHEN Honghan, SU Ao, et al. Eocene source rock determination in Qiongdongnan Basin, the South China Sea: a hydrocarbon detection perspective[J]. *Earth Science*, 2016, 41(9): 1539–1547.
- [15] 刘可禹, 鲁雪松, 桂丽黎, 等. 储层定量荧光技术及其在油气成藏研究中的应用[J]. *地球科学*, 2016, 41(3): 373–384.
LIU Keyu, LU Xuesong, GUI Lili, et al. Quantitative fluorescence techniques and their applications in hydrocarbon accumulation studies[J]. *Earth Science*, 2016, 41(3): 373–384.
- [16] 陶士振, 邹才能. 东海盆地西湖凹陷天然气成藏及分布规律[J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(4): 103–110.
TAO Shizhen, ZOU Caineng. Accumulation and distribution of natural gases in Xihu sag, East China Sea Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(4): 103–110.
- [17] 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, 2004: 239–267.
HAO Fang. Kinetics of hydrocarbon generation and mechanisms of petroleum accumulation in overpressured basins[M]. Beijing: Science Press, 2004: 239–267.
- [18] LEE Y, DEMING D. Overpressures in Anadarko basin, southwestern Oklahoma: Static or dynamic?[J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(1): 145–160.
- [19] 郝雪峰. 东营凹陷沙三一沙四段砂岩储层超压成因与演化[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(2): 167–173.
HAO Xuefeng. Overpressure genesis and evolution of sandstone reservoirs in the 3rd and 4th members of Shahejie Formation, the Dongying Depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(2): 167–173.
- [20] 苏奥, 陈红汉, 马玉华, 等. 东海盆地西湖凹陷孔雀亭气区气侵条件及主控因素[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(2): 292–300.
SU Ao, CHEN Honghan, MA Yuhua, et al. Geologic conditions and main controlling factors of gas washing in Kongqueting region in Xihu Depression, Eastern Sea Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(2): 292–300.
- [21] SMITH D A. Sealing and nonsealing faults in Louisiana Gulf Coast Salt basin[J]. *AAPG Bull*, 1980, 64(2): 145–172.
- [22] 苏奥, 陈红汉, 王存武, 等. 东海盆地西湖凹陷天然气来源探讨[J]. *地质科技情报*, 2014, 33(1): 157–162.
SU Ao, CHEN Honghan, WANG Cunwu, et al. Source of natural gas in Xihu depression of the East China Sea Basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2014, 33(1): 157–162.
- [23] HAO Fang, LI Sitian, DONG Weiliang, et al. Abnormal organic matter maturation in the Yinggehai Basin, offshore South China Sea: Implications for hydrocarbon expulsion and fluid migration from overpressured systems[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1998, 21(4): 427–444.
- [24] 石万忠, 宋志峰, 王晓龙, 等. 珠江口盆地白云凹陷底辟构造类型及其成因[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2009, 34(5): 779–784.
SHI Wanzhong, SONG Zhifeng, WANG Xiaolong, et al. Diapir structure and its origin in the Baiyun depression, Pearl River Mouth Basin, China[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2009, 34(5): 779–784.
- [25] THOMPSON K F M. Light hydrocarbons in subsurface sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979, 43(5): 657–672.