

何雁兵, 郑金云, 张明. 白云深水区地层破裂压力计算方法及应用[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(5): 41-50.

HE Yanbing, ZHENG Jinyun, ZHANG Ming. Calculation method and application of formation fracture pressure in Baiyun deepwater area[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(5): 41-50.

# 白云深水区地层破裂压力计算方法及应用

何雁兵, 郑金云, 张明

(中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518054)

**摘要:** 地层破裂压力不仅可以用于钻井设计, 也可用于盖层封烃高度、流体底辟区古压力系数等重要参数的计算。本次研究分析整理了白云深水区 38 口探井的测井数据, 构建了泥岩密度随埋深的变化趋势, 明确了研究区正常压实泥岩密度随埋深表现出“三段式” (<800、800~1 200、>2 200 m) 变化趋势, 并拟合出静岩压力及泊松比随深度变化的动态公式。采取 Eaton 法建立了不同水深条件下的地层破裂压力图版, 结果与实钻井地漏测试结果吻合较好。利用编制的破裂压力-深度图版, 明确了浅埋藏区圈闭盖层最大封烃高度计算方法, 证实深水、超深水区薄盖层依然具备封烃能力; 结合油气成藏期次研究, 明确了近白云凹陷中心位置 B2 钻井周边底辟区的最大古压力系数为 1.69~1.713。综合分析推测在研究区孔隙压力达到上覆泥岩破裂压力值的 90% 附近时, 超压体系产生裂缝, 泥岩盖层受到破坏, 油气漏失。

**关键词:** 珠江口盆地; 白云深水区; 地层破裂压力; 封烃高度计算; 古压力系数

中图分类号: P744.4 文献标识码: A DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.245

## 0 引言

南海北部珠江口盆地白云凹陷是已被勘探实践证实的富生烃凹陷, 生烃潜力巨大, 截至 2019 年底, 累计发现三级地质储量天然气近  $3\ 000\times 10^8\ \text{m}^3$ 、原油近  $8\ 000\times 10^8\ \text{m}^3$ <sup>[1]</sup>。随着勘探的深入, 目标紧缺的矛盾日趋突出, 白云深水区-超深水区位于南海北部陆缘地壳薄化带上, 地壳厚度从北侧的 29 km 迅速减薄至 17~18 km, 地壳岩石圈强烈伸展薄化使得陆缘深水区具有特殊的断裂结构样式与沉降特征<sup>[1-4]</sup>, 具有明显不同于珠一坳陷的基础石油地质条件。受控于 23.03 Ma 的构造事件<sup>[5]</sup>, 白云凹陷出现强烈的沉降, 导致陆架坡折带由白云凹陷南部迁移至白云北坡的番禺低隆起区, 总体位于坡折带下方的白云凹陷处于深水沉积环境, 形成 SB23.03 界面

之上以深水重力流为主导的相对富泥的储-盖组合<sup>[1]</sup>。该事件也导致古珠江单边物源体系的形成与变迁, 致使研究区部分构造尤其是远离北部物源区的构造面临上覆地层厚度较薄, 圈闭盖层封烃能力不足的风险, 制约勘探进程, 而泥岩破裂压力研究可以用于盖层封烃高度计算, 对圈闭盖层封烃能力进行定量评价。

破裂压力的研究始于水力压裂过程的分析, 1957 年, HUBBERT 与 WILLIS<sup>[6]</sup> 通过理论分析与室内试验相结合的方法, 首次提出地层破裂压力预测方法, 即 H-W 模型。1967 年, MATTHEWS 和 KELLY<sup>[7]</sup> 在 H-W 模型中引入了骨架应力系数  $K_i$ ,  $K_i$  系数曲线的绘制需要大量实际压裂资料, 限制了此方法的应用<sup>[8]</sup>。1967 年, HAIMSON 和 FAIRHURST<sup>[9]</sup> 考虑了井壁上的应力集中, 打破水平方向上应力均匀的假设, 考虑了互相垂直的 2 个不相等的水平主地应力<sup>[10]</sup>。1969 年, EATON<sup>[11]</sup> 等人在 HUBBERT 和 WILLIS 方法的基础上修正了破裂压力模型, 引入泊松比和可变的上覆压力梯度。1973 年, ANDERSON 等<sup>[12]</sup> 通过引入 BIOT 多孔弹性系数, 将地层性质的变化引入地层破裂压力公式。1982 年, STEPHEN<sup>[13]</sup> 等提出预测破裂压力时考虑构造应力

收稿日期: 2021-09-12

资助项目: 中海石油(中国)有限公司勘探生产科研重大项目“珠江口盆地(东部)浅水区古近系油气成藏条件及勘探突破方向”(SCKY-2020-SZ-21)

作者简介: 何雁兵(1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事石油地质综合研究工作。E-mail: heyb5@cnoc.com.cn

影响,并假设地层构造应力是均匀的,引入构造应力系数 $\beta$ 。1984年,黄荣樽<sup>[14]</sup>分析了地质构造应力产生的非均匀地应力场,同时考虑岩石抗张强度、井眼的应力集中等因素,提出了一种预测精度更高的适用于存在水平非均匀构造应力的破裂压力模型,即黄氏模型。2000年,李传亮<sup>[15]</sup>根据多孔介质的双重有效应力概念,把已有的H-W及H-F公式统一起来,提出了射孔完井条件下油井压裂过程中岩石破裂压力的计算公式。2004年,聂采军等<sup>[16]</sup>用BP神经网络和多元回归分析法对碳酸盐岩地层实测破裂压力数据进行统计建模和预测研究。2009年,任岚等<sup>[17]</sup>考虑岩石变形与流体渗流的全耦合作用,采用有限元法数值计算技术,求得岩石破裂压力及破裂时间。2019年,马妮等<sup>[18]</sup>基于页岩各向异性探讨了页岩地层的破裂压力地震预测方法。2021年,谢静等<sup>[19]</sup>提出并建立了一种新的考虑砂泥岩抗拉强度的深水海域地层破裂压力预测模型。地层破裂压力预测方法众多,但多是Eaton法、黄荣樽法的延伸及优化。

现阶段破裂压力的研究主要用于钻井设计及压力设计,而对破裂压力在圈闭盖层封烃能力计算及古压力系数求取方面的应用鲜有涉及,本次研究笔者通过收集整理研究区38口已钻井资料,采用Eaton法建立了研究区不同水深条件下的破裂压力图版,该图版可用于破裂压力快速求取,同时利用图版明确了浅埋藏区圈闭盖层封烃能力,以期为后

续目标评价及推动目标上钻提供有力支撑。此外,随着研究区钻井数量的增加,超压现象越来越普遍<sup>[20]</sup>,但是靠近洼陷中心区钻井稀少,古压力系数峰值求取存在一定难度,但研究区底辟现象发育,通过对破裂压力研究并结合底辟发育过程分析,可以求取古压力系数等参数,为成藏期次及排烃强度等成藏研究提供重要参考。

## 1 地质背景

白云凹陷位于珠江口盆地珠二拗陷,是该盆地新生界地层发育最完整的深大拗陷。白云深水勘探面积近30 000 km<sup>2</sup>,最大沉积地层厚度超过10 000 m<sup>[20]</sup>。白云凹陷北侧是番禺低隆起,南侧为云荔低隆起,西侧与神狐暗沙隆起和珠二拗陷西段相邻,东侧为东沙隆起,根据凹陷内不同地区沉降、沉积差异性,划分为白云主洼、白云东洼、白云西洼和白云南洼4个次一级生烃洼陷<sup>[21-22]</sup>(图1)。白云深水区自新生代以来经历了裂陷期(66~33.9 Ma)、裂解期(33.9~23.03 Ma)和裂后热沉降期(23.03~0 Ma)3个基本阶段<sup>[1]</sup>,自下而上相应发育下始新统文昌组陆相断陷湖盆沉积、上始新统恩平组大型湖盆沉积、渐新统珠海组海陆过渡相三角洲沉积以及中新统以来的珠江组-韩江组-粤海组-万山组陆架边缘三角洲-陆坡深水沉积(图1),形成了独特的3层盆地结构以及时间和空间上良好的生储盖组合

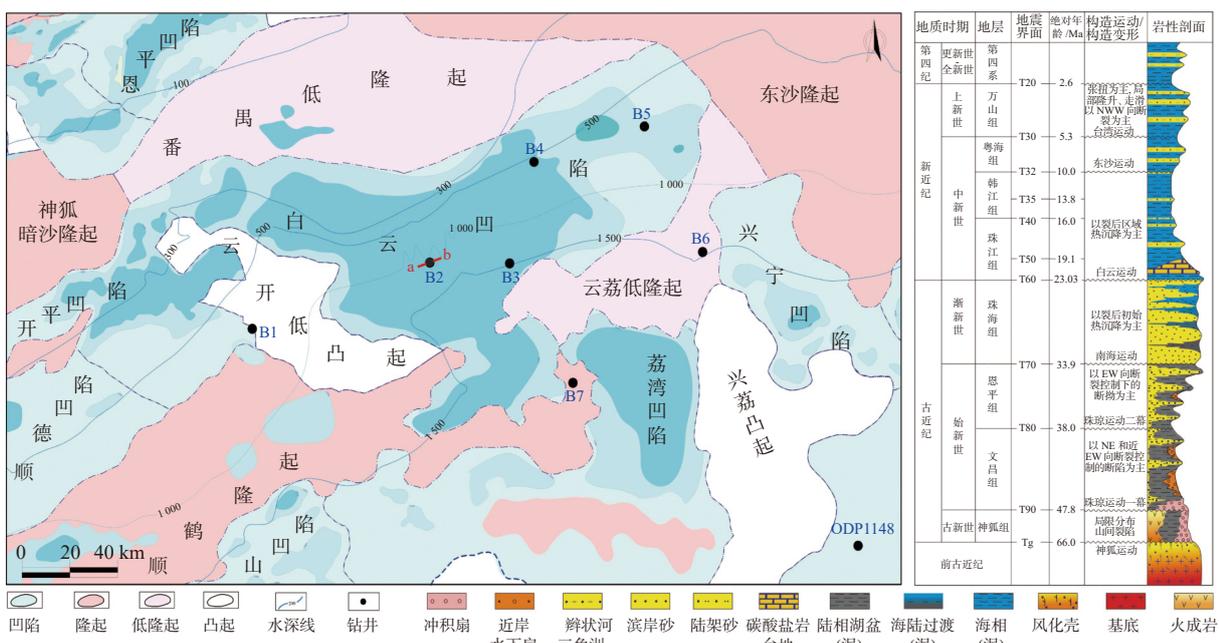


图1 珠江口盆地白云深水区构造单元划分及地层综合柱状图

Fig.1 Tectonic units division and stratigraphic comprehensive histogram of Baiyun deepwater area in Pearl River Mouth Basin

条件<sup>[21]</sup>。

## 2 研究方法选取及关键点

地层破裂压力定义为使地层产生水力裂缝或张开原有裂缝时的井底流体压力<sup>[8]</sup>。地层破裂压力的获取主要有直接法和间接法, 直接法指采用地漏实验或者岩石力学实验直接测定地层破裂压力, 该方法获取的数据比较准确, 但不具有连续性; 间接法则是根据经验公式或数学模型等方法间接求取, 能够获取连续的纵向破裂压力曲线, 且经济可靠, 因此应用较广。现阶段使用较多的间接预测方法主要有 Eaton 法、Stephen 法及黄荣樽法。Eaton 法考虑了上覆岩层压力、孔隙压力, 且指出影响地层破裂压力的泊松比是随深度变化的函数, 符合实际地质情况, 但该模型没有考虑不均匀的原地应力或者地质构造应力影响<sup>[23]</sup>。Stephen 模型考虑了地质构造运动的影响, 引入了构造应力系数, 但是忽视了水平地应力的非均匀性对地层泊松比的影响。黄荣樽基于非均匀地应力场分析井壁岩石破裂条件, 并考虑了岩石抗张强度的影响, 预测精度相对较高, 此方法需要通过室内岩石三轴试验获取抗拉强度、泊松比, 通过地层破裂压力实验确定地下岩层中的构造应力系数。

虽然黄氏方法更精确, 但对参数要求较高, 而研究区水深较大, 钻井成本较高, 钻井取芯较少, 缺乏岩石抗拉强度、非均匀构造应力系数等岩石力学参数。同时, 研究区钻井密度相对较低, 井间距较大, 单井获取的岩石力学参数并不适用于研究区所有区域, 因此, 在保证参数取值准确的情况下, 引入过多参数有可能导致计算结果误差增大, 故本次采用不确定参数相对较少且具有一定计算精度的 Eaton 法。Eaton 法所需要的重要参数为泊松比及孔隙压力, 而研究区实测孔隙压力数据丰富, 使用实测数据可避免测井资料分析法、等效深度法等方法求取孔隙压力过程中因主观经验影响导致的误差; 而泊松比计算所需的纵、横波速度也来自测井实测, 避免了在横波换算中产生的误差, 计算精度较高。

### 2.1 Eaton 法计算方法

Eaton 法计算公式为<sup>[11]</sup>:

$$P_f = \frac{\mu}{1-\mu}(P_o - P_p) + P_p \quad (1)$$

式中:  $P_f$  为地层破裂压力, MPa;  
 $\mu$  为地层的泊松比, 无量纲;  
 $P_o$  为上覆岩层压力, MPa;  
 $P_p$  为地层孔隙压力,  $\text{g/cm}^3$ 。

### 2.2 Eaton 法各参数求取

#### 2.2.1 孔隙压力 ( $P_p$ ) 计算

地层孔隙压力是指由于沉积物的压实作用, 地层中孔隙流体(油、气、水)所承受的压力<sup>[24]</sup>。地层孔隙压力计算方法较多, 有直接预测法、指数法、测井资料分析法、等效深度法等<sup>[24-29]</sup>。考虑到研究区 MDT、PVT 实测压力数据较为丰富, 本次研究选取 26 口井的实测压力数据点共计 248 个, 对数据点进行拟合后获取孔隙压力随埋深的变化关系(图 2)。所选取的钻井均匀分布于白云凹陷, 水深 246~2 451 m, 测压数据点埋深 708~3 342 m, 水深及埋深覆盖范围广, 具有较好的代表性。

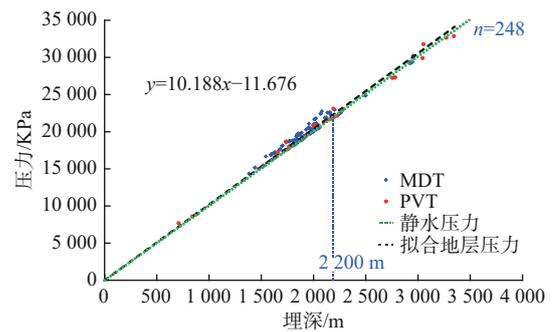


图 2 白云深水区地层孔隙压力随埋深变化关系

Fig.2 Relationship between formation pore pressure and buried depth in Baiyun deepwater area

由拟合结果可知, 埋深  $< 2 200$  m, 拟合地层孔隙压力与静水压力基本一致; 埋深  $> 2 200$  m, 拟合获取的地层压力略大于静水压力(图 2), 说明埋深  $< 2 200$  m 为主要正常压实阶段, 埋深  $> 2 200$  m 后, 开始有异常压力出现。泥岩声波时差对数值随埋深变化关系图(图 3)也显示在埋深  $> 2 200$  m 后, 存在偏离正常趋势的低速点, 印证欠压实的存在。

#### 2.2.2 静岩压力计算

静岩压力是指覆盖在某一深度地层以上的地层基岩和岩石孔隙中流体的总重量所造成的对这个地层的压力<sup>[28]</sup>。

$$P_o = \int_0^H 10^{-3} \rho_b(H) g dH \quad (2)$$

式中:  $P_o$  为静岩压力, MPa;

$H$  为目的层深度, m;

$\rho_b(H)$  为  $H$  深度岩层的体积密度,  $\text{g/cm}^3$ 。

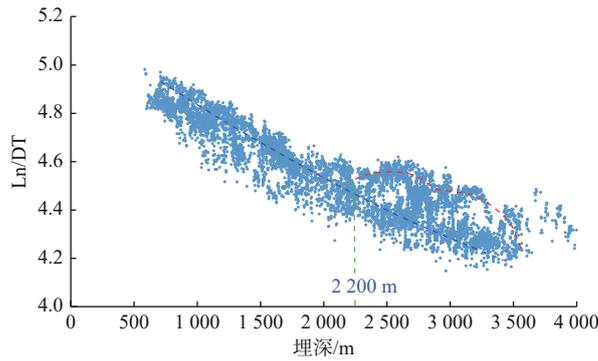


图3 白云深水区泥岩声波时差（取对数）随埋深变化关系

Fig.3 Relationship between acoustic time difference and buried depth of mudstone in Baiyun deepwater area

本次研究数据来源于白云深水区均匀分布的13口已钻井及大洋钻探 ODP1148 站点测井数据, 由于测井泥岩数据点数量庞大, 需要对泥岩数据点进行抽稀, 即保持固定间隔选取厚层泥岩测井密度数据点, 避免因数据点在局部分布过于集中而影响拟合结果, 最终共筛选出数据点 5 323 个, 深度分布在 246~4 000 m 范围内。对筛选后的泥岩密度点进行拟合, 获取泥岩密度随埋深变化曲线(图 4), 结果表明白云深水区存在正常压实和欠压实 2 种趋势。由于深水区钻井浅层(<600 m)测井数据点较少, 快速压实阶段界限值确定存在一定难度, 而珠江口盆地惠州凹陷钻井密度最高, 其浅部泥岩快速压实阶段界限在 700 m 附近<sup>[30]</sup>, 参照惠州凹陷划分标准并根据实际投点(图 4)拟合情况, 确定 800 m 快速压实界限; 结合实际测压及泥岩声波时差(图 2、3)拟合结果, 2 200 m 为稳定压实与紧密压实的界限。综上, 正常压实泥岩密度随埋深变化趋势可分为

3 段: 0~800 m 快速压实, 800~2 200 m 稳定压实, >2 200 m 紧密压实(图 4)。

依据不同压实阶段的泥岩密度随埋深变化规律, 拟合出各段的计算公式, 便可求取在任意埋深处的泥岩密度( $\rho_b$ ), 再利用公式(2), 即可获取任一埋深处的上覆静岩压力值( $P_o$ )。再对求取的不同埋深点的结果值进行拟合, 获取静岩压力随埋深变化完整计算公式(图 5)。

### 2.2.3 泊松比求取

泊松比是指材料在单向受拉或受压时, 横向正应变与轴向正应变的绝对值比值, 其是评价岩石变形特征的重要参数之一, 主要通过实验室测定和测井资料计算得到<sup>[31]</sup>。实验室测定岩石力学参数成本较高且存在局限性, 通常利用测井资料计算获取连续岩石泊松比参数<sup>[32]</sup>。本次研究选用 15 口钻井的泥岩实测纵、横波声波数据求取纵、横波速度比( $V_p/V_s$ ), 拟合获取其随埋深变化计算公式(图 6),

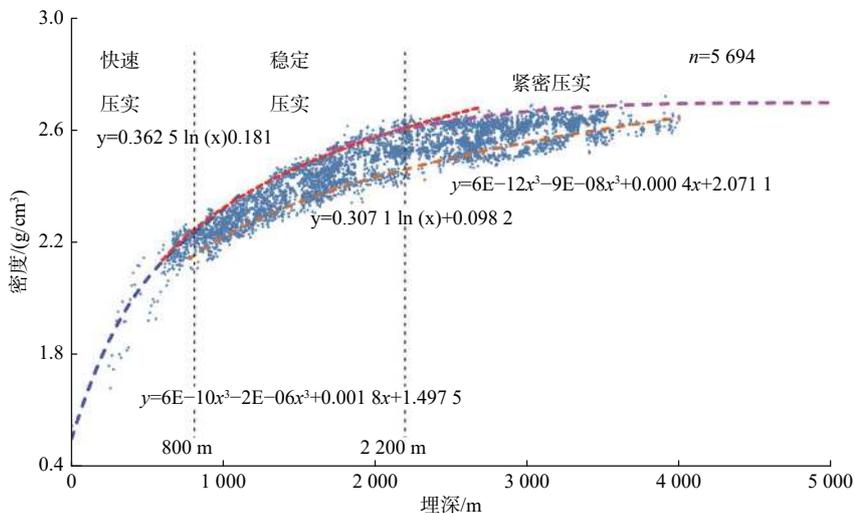


图4 白云深水区已钻井泥岩密度随埋深（泥线以下）变化曲线

Fig.4 Relationship between mudstone density and buried depth of drilled wells in Baiyun deepwater area

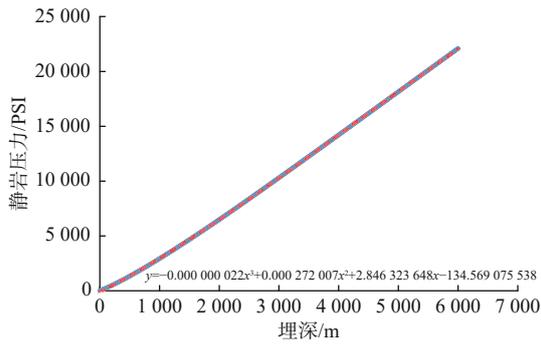


图 5 白云深水区静岩压力随埋深变化关系

Fig.5 Relationship between lithostatic pressure and burial depth in Baiyun deepwater area

再结合式(3)<sup>[28]</sup>即可获取泥岩地层随埋深变化的动态泊松比( $\mu$ )。

$$\mu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1\right)} \quad (3)$$

式中:  $\mu$ 为岩石泊松比;

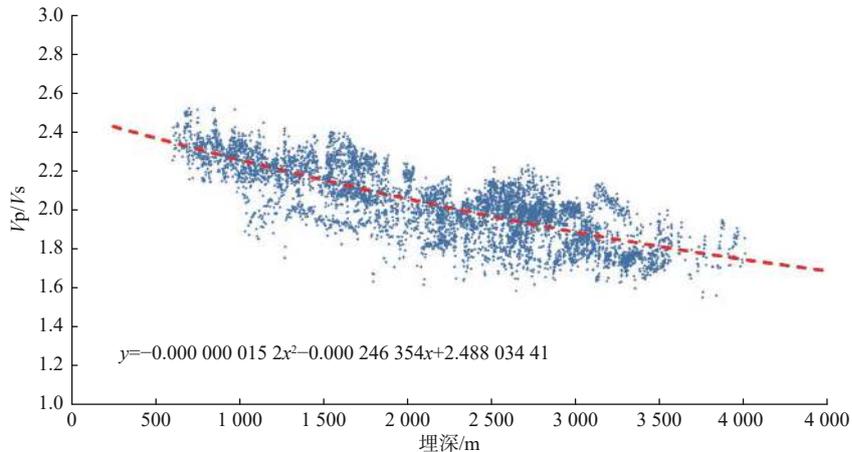


图 6 白云深水区泥岩纵波/横波比值随埋深变化关系

Fig.6 Relationship between P-wave / S-wave ratio of mudstone and buried depth in Baiyun deepwater area

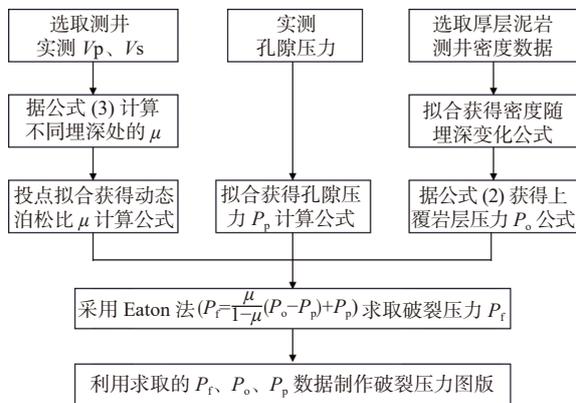


图 7 Eaton 法泥岩地层破裂压力图版制作流程

Fig.7 Production flow chart of fracture pressure chart of mudstone formation by Eaton method

$V_p$  为纵波速度, us/ft;  
 $V_s$  为横波速度, us/ft。

### 2.3 破裂压力图版制作

在获取孔隙压力、泊松比、静岩压力关键参数后,便可利用 Eaton 法(1)求取地层的破裂压力(图 7),并制作破裂压力图版。白云凹陷水深 300~2 000 m<sup>[20]</sup>,水深变化范围大,上覆水体对静岩压力产生的影响也存在较大差异,因此计算静岩压力时,不能忽视水深产生的影响。通过简单换算,即在 0 m 水深计算基础上,增加水深对孔隙压力、静岩压力值的影响,可以获取白云深水区不同水深条件下的破裂压力图版(图 8),利用该图版可快速读取不同水深条件下不同深度的地层破裂压力值。在实际钻井过程中,部分井会进行地漏试验,可以利用试验结果值对破裂压力计算结果进行验证,验证结果证实计算结果与实测数据吻合性较好(图 8),实测点皆分布在预测曲线附近,证实此方法准确可靠。

由破裂压力随埋深变化标准图版可知(图 9),计算获得的破裂压力曲线与由实测漏失点拟合的破裂压力曲线基本一致;同时可以发现破裂压力 \*0.9 这条线可以把全部实测漏失点包络在内,推测孔隙压力达到破裂压力的 90% 左右时,超压导致裂缝产生,地层开始漏失。利用该压力图版,可以获得地漏实验缺乏井段(>3 000 m)的地层破裂压力数据。

### 3 破裂压力应用

破裂压力应用广泛,不仅可以用于浅埋藏区最大

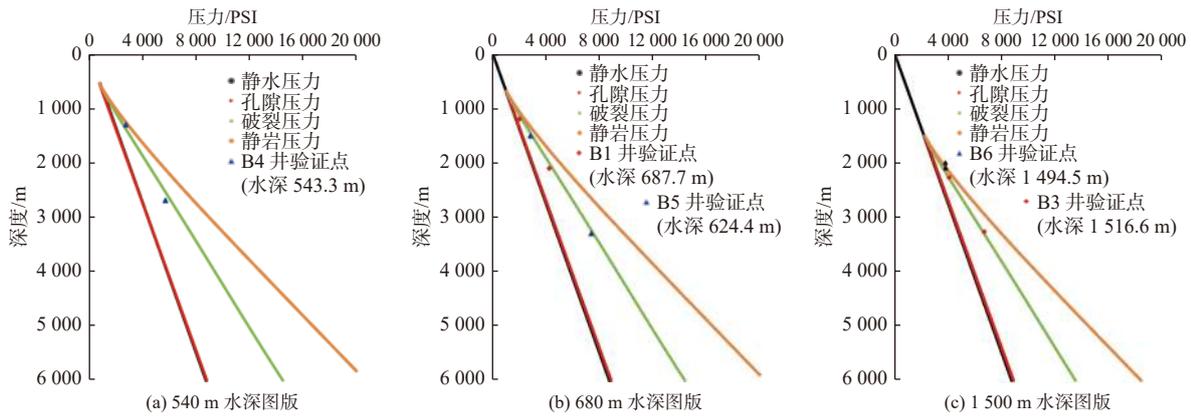


图8 白云凹陷不同水深条件下破裂压力随深度变化

Fig.8 Fracture pressure changes with depth under different water depths in Baiyun sag

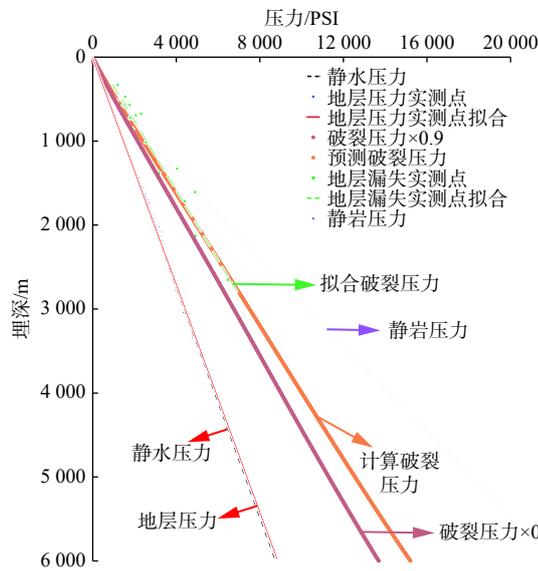


图9 白云深水区破裂压力随埋深变化

Fig.9 Fracture pressure change with depth in Baiyun deepwater area

烃柱高度以及底辟带古压力系数计算,还可用于钻井和压裂设计。本次研究主要探讨利用破裂压力图版计算泥岩盖层封烃高度及底辟带古压力系数求取。

### 3.1 浅埋藏区最大烃柱高度计算

以 B6 和 B7 井为例探讨利用压力图版计算浅埋藏区圈闭盖层最大封烃高度方法。首先根据水深选取相应的压力图版,明确盖层底深  $H_1$ ,在图版中绘制  $H_1$  深度平行线与破裂压力线相交获得交点 A,沿 A 点绘制斜线(图 10 中蓝线,斜率  $K=1/(\rho_{\text{烃}} \times g \times 0.145)$ )与孔隙压力线相交获得 B 点,读取 B 点对应深度,便可获取盖层的封烃高度( $H_2-H_1$ )。

B6 井泥岩盖层厚度 502.6 m,计算封烃高度为 394 m, B7 井泥岩盖层厚度 711.1 m,计算盖层封烃

高度为 940 m(表 1),实钻揭示 B7 井上覆 711 m 泥岩封盖近 170 m 气柱高度,证实浅埋藏区泥岩盖层具备较好封烃能力,若充注强度继续增加, B7 井的气柱高度则会更大,直至达到封烃高度的极限值。

盖层厚度相差较小,但封烃高度相差很大(表 1),主要是由于烃密度大小不同所致,即其他条件相同,烃密度增大,盖层封烃高度增大。深水、超深水区圈闭目的层虽埋深偏小,但水深较大,孔隙压力偏大,由理想气体状态方程  $pV=nRT$  可知,体积  $v$ 、温度  $T$  不变,压强  $P$  增大会导致烃密度增加,因此深水、超深水区薄盖层依然可封盖较高的烃柱。

### 3.2 底辟带古压力系数计算

白云凹陷 B2 构造底部发育底辟现象,同时该构造靠近白云凹陷生烃中心,该井古压力系数的求取,可以为白云凹陷生排烃强度研究提供重要参考。B2 井主要目的层上覆盖层为最大海泛面(MFS19.1)及之上的泥岩,井区油气通过底辟和断裂向构造高部位运聚成藏,随着上覆地层沉积,以及生、排烃活动, MFS19.1 之下地层积聚超压;下部超压地层在构造高部位形成高温、高压流体底辟,当压力聚集到一定程度时,油气通过底辟和断裂向浅层运聚,超压获得释放;在某个地质时期,底辟带闭合,珠江组泥岩封盖层之下的地层再次开始积聚超压,油气再次向构造部位聚集(图 11)。

因此,只有下伏超压地层中的超压聚集达到上覆盖层的破裂压力时,才能刺穿上覆地层,发生底辟现象,所以可通过求取底辟发生时上覆盖层(MFS19.1)的破裂压力来推算底辟形成时的地层压力。前人根据包裹体分析结果将白云凹陷油气充注划分为 2 期,第 1 期距今 13.1~7.30 Ma,主要为黄色荧光成熟油充注;第 2 期距今 5.5~0 Ma,主要

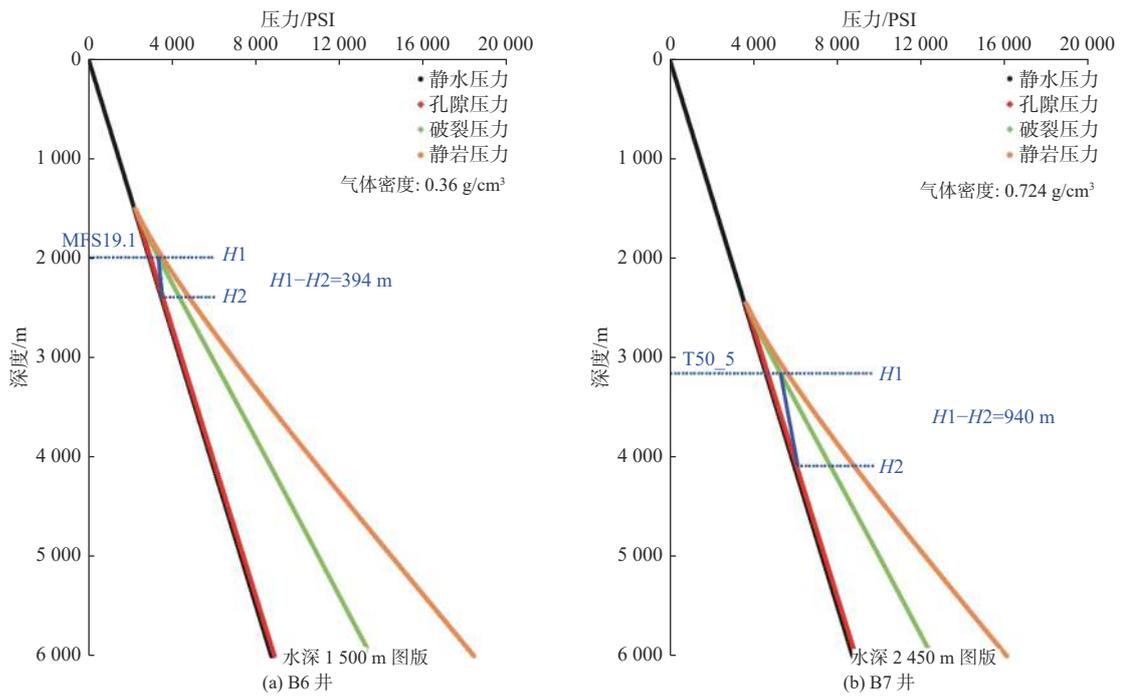


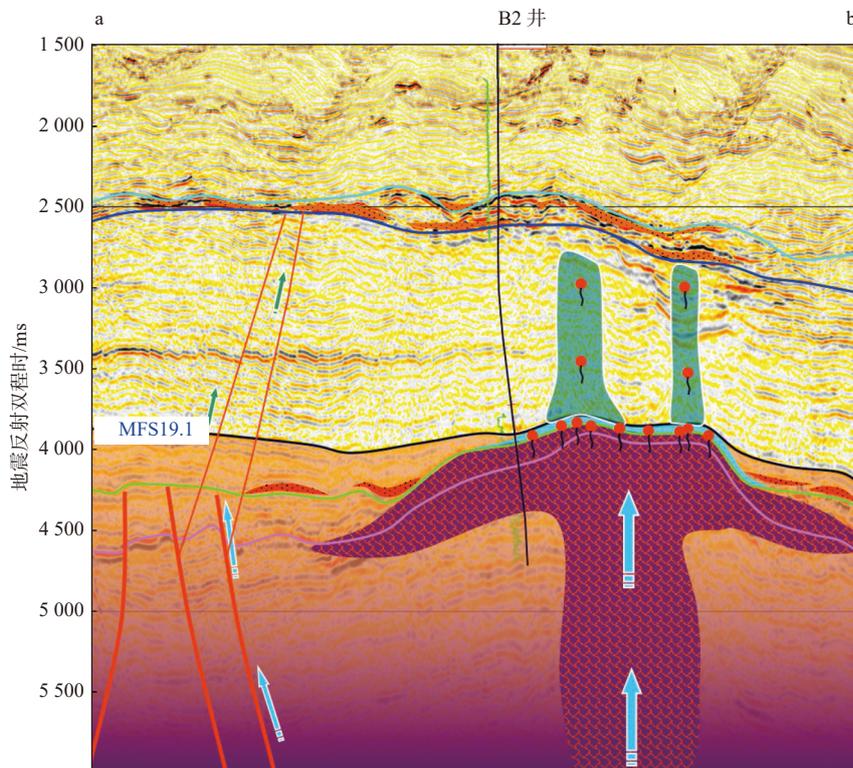
图 10 白云凹陷盖层封烃压力计算

Fig.10 Hydrocarbon sealing pressure calculation chart of well B6 and well B7 in Baiyun Sag

表 1 B6 井及 B7 井盖层封烃高度计算

Table 1 Hydrocarbon sealing height of Well B6 and Well B7 cap

井位	水深/m	盖层地震层位	盖层底深/m	盖层埋深/m	封烃高度/m
B6	1 494.5	MFS19.1	1 997.1	502.6	394
B7	2 451.43	T50_5	3 162.5	711.07	940



剖面位置见图 1

图 11 白云凹陷 B2 井底辟带成藏模式

Fig.11 Accumulation model of bottom diapir zone of Well B2 in Baiyun Sag

为蓝色荧光高成熟油和天然气充注<sup>[21]</sup>。结合项目组综合研究成果,底辟时间存在两种可能:10.5 Ma、5 Ma。

通过压力图版(图12)可求得,若底辟发生时间为5 Ma,地层古压力系数为1.173;若底辟发生时间为10 Ma,古压力系数为1.69(表2)。

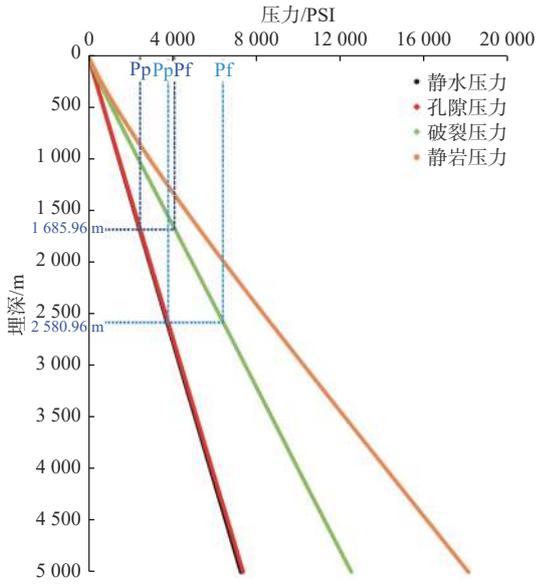


图12 白云凹陷 B2 井区底辟带破裂压力图版

Fig.12 Fracture pressure chart of bottom diapir zone around Well B2 in Baiyun Sag

表2 白云凹陷 B2 井区底辟发生时地层古压力系数 (破裂/静水) 估算

Table 2 Estimation of ancient formation pressure coefficient when the bottom diapir happens in Well B2 area of Baiyun Sag

底辟时间/Ma	封盖层段	底辟发生时封盖层埋深/m	破裂压力/静水压力比值
5	MFS19.1	2 580.96	1.713
10.5	MFS19.1	1 685.96	1.69

实测点破裂/静水压力值主要集中在1.2~1.7(图13a、b),随埋深增加,泥岩破裂压力/静水压力比值逐渐增加,当埋深>2 000 m,破裂/静水压力值虽增加,但增加趋势迅速减小。实测点数据表明破裂/静水压力比值皆>1.7,推测1.7倍静水压力是个比较特殊的系数面,超过这个面,封盖系统被破坏的可能性较大。

### 4 结论

(1)白云深水区正常压实泥岩密度随埋深变化分为3段,0~800 m为快速压实阶段、800~2 200 m为稳定压实阶段、>2 200 m为紧密压实阶段。

(2)采用 Eaton 法建立了研究区不同水深条件下的破裂压力图版,且与实钻井地漏测试结果吻合较好;利用建立的图版明确了浅埋藏区圈闭盖层最

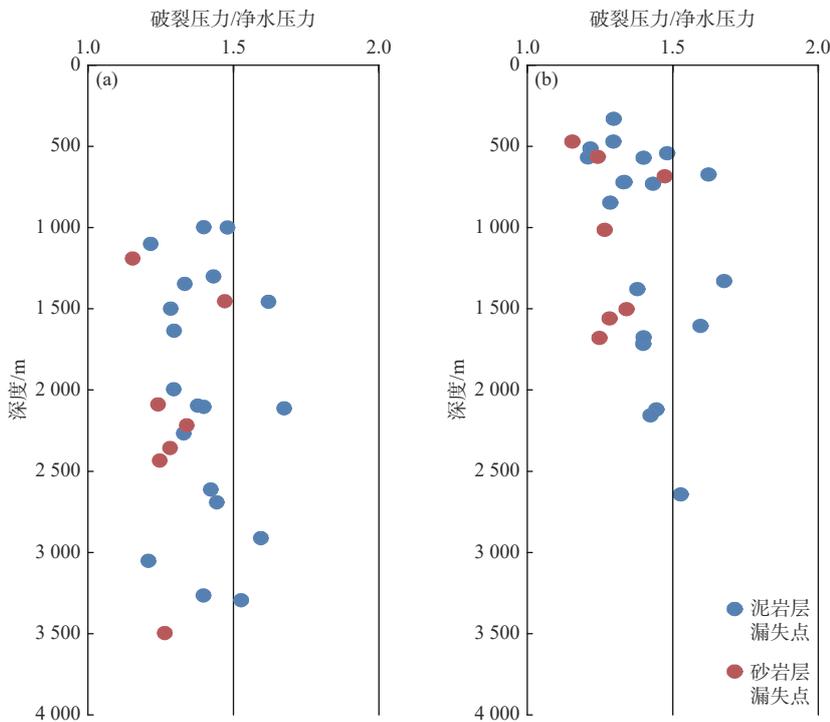


图13 白云深水区已钻井实测漏失点破裂/静水压力值随深度、埋深变化

Fig.13 The ratio of measured fracture pressure to net hydrostatic pressure of drilled wells in Baiyun deepwater area varies with depth and burial depth

大封烃高度计算方法, 证实深水、超深水区薄盖层依然具备封烃能力; 结合成藏期次研究, 明确了 B2 井围区底辟区的最大古压力系数为 1.69~1.713。

(3) 研究区孔隙压力达到破裂压力的 90% 左右时, 超压体系产生裂缝, 地层开始漏失; 1.7 倍静水压力是个比较重要的系数面, 推测压力系数超过 1.7, 封盖系统被破坏的可能性比较大。

(4) 深水区破裂压力图版的制作具有重要意义, 借助已建立的图版, 可快速用于封烃高度计算、底辟区古压力系数计算、压裂分析等一系列工作, 服务于勘探发现。

#### 参考文献:

- [1] 柳保军, 庞雄, 王家豪, 等. 珠江口盆地深水区伸展陆缘地壳减薄背景下的沉积体系响应过程及油气勘探意义[J]. *石油学报*, 2019, 40(S1): 124-138.
- [2] 李洪博, 郑金云, 庞雄, 等. 南海北部陆缘差异拆离作用结构样式与控制因素: 以珠江口盆地白云-荔湾深水区为例[J]. *中国海上油气*, 2020, 32(4): 24-35.
- [3] 庞雄, 任建业, 郑金云, 等. 陆缘地壳强烈拆离薄化作用下的油气地质特征: 以南海北部陆缘深水区白云凹陷为例[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(1): 27-39.
- [4] 庞雄, 郑金云, 梅廉夫, 等. 先存俯冲陆缘背景下珠江口盆地断陷结构的多样性[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(4): 1-11.
- [5] 邵磊, 庞雄, 陈长民, 等. 南海北部渐新世末沉积环境及物源突变事件[J]. *中国地质*, 2007, 32(6): 1022-1031.
- [6] HUBBERT M K, WILLIS D G. Mechanics of hydraulic fracturing[J]. *Petroleum Transactions*, 1957, 210: 153-168.
- [7] MATTHEWS W R, KELLY J. How to predict formation pressure and fracture gradient from electric and sonic logs[J]. *Oil and Gas Journal*, 1967, 65(8): 92-106.
- [8] 周拿云, 杨兆中. 地层破裂压力预测技术综述[J]. *重庆科技学院学报(自然科学版)*, 2011, 13(1): 36-39.
- [9] HAIMSON B, FAIRHURST C. Initiation and extension of hydraulic fractures in rocks[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1967, 7(6): 310-318.
- [10] 石杨梦. 川东北须二段裂缝性致密气藏破裂压力预测研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- [11] EATON B A. Fracture gradient prediction and its application in oilfield operations[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1969, 21(10): 1353-1360.
- [12] ANDERSON R A, INGRAM D S, ZANIER A M. Determining fracture pressure gradient from well log[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1973, 25(11): 1259-1268.
- [13] STEPHEN R D. Prediction of fracture pressures for wildcat wells[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1982, 34(4): 863-872.
- [14] 黄荣樽. 地层破裂压力预测模式的探讨[J]. *华东石油学院学报*, 1984, 8(4): 335-347.
- [15] 李传亮. 射孔完井条件下的岩石破裂压力计算公式[J]. *石油钻采工艺*, 2002, 24(2): 37-38.
- [16] 聂采军, 赵军, 夏宏权, 等. 地层破裂压力测井预测的统计模式研究[J]. *天然气地球科学*, 2004, 15(6): 633-636.
- [17] 任岚, 赵金洲, 胡永全, 等. 水力压裂时岩石破裂压力数值计算[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(S2): 3417-3422.
- [18] 马妮, 林正良, 胡华锋, 等. 页岩地层的破裂压力地震预测方法[J]. *石油物探*, 2019, 58(6): 926-934.
- [19] 谢静, 吴惠梅, 楼一珊, 等. 南海深水海域高温高压地层破裂压力预测模型[J]. *断块油气田*, 2021, 28(3): 378-382.
- [20] 田立新, 张忠涛, 庞雄, 等. 白云凹陷中深层超压发育特征及油气勘探新启示[J]. *中国海上油气*, 2020, 32(6): 1-11.
- [21] 米立军, 张忠涛, 庞雄, 等. 南海北部陆缘白云凹陷油气富集规律及主控因素[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(5): 902-913.
- [22] 郭帅, 杨海长, 曾清波, 等. 白云凹陷恩平组南部物源研究及其油气地质意义[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(6): 56-63.
- [23] 赵毅. 考虑温度影响的深水地层破裂压力研究[D]. 武汉: 长江大学, 2020.
- [24] 刘厚彬, 孟英峰, 王先起, 等. 利用测井资料预测地层孔隙压力方法研究综述[J]. *西部探矿工程*, 2006, 122(6): 91-93.
- [25] 秦绪英, 周巍, 陈有明. 地层孔隙压力及破裂压力计算方法研究[C]//中国石化石油勘探开发研究院南京石油物探研究所 2004 年学术交流会, 中国南京, 2004.
- [26] 魏茂安, 陈潮, 王延江, 等. 地层孔隙压力预测新方法[J]. *石油与天然气地质*, 2007, 28(3): 395-400.
- [27] 时贤, 程远方, 梅伟. 基于测井资料的地层孔隙压力预测方法研究[J]. *石油天然气学报*, 2012, 34(8): 94-98.
- [28] 郭金荣. 他拉哈地区地层孔隙压力及破裂压力预测技术研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2006.
- [29] 邹玮, 孙鹏, 张书平, 等. 西湖凹陷钻前压力预测技术及应用[J]. *海洋地质前沿*, 2016, 32(8): 47-51.
- [30] 郑丹, 徐思煌, 尚小亮. 珠江口盆地惠州凹陷泥岩压实特征及其成因[J]. *地球科学与环境学报*, 2010, 32(4): 372-377.
- [31] 张智勇. 苏里格气田低孔低渗地层破裂压力的测井计算方法研究[J]. *国外测井技术*, 2013, 195(3): 34-37.
- [32] 冯启宁. 用测井资料计算地层破裂压力的公式和方法[J]. *华东石油学院学报*, 1983, 11(3): 41-48.

## Calculation method and application of formation fracture pressure in Baiyun deepwater area

HE Yanbing, ZHENG Jinyun, ZHANG Ming

(Shenzhen Branch of CNOOC(China)Ltd., Shenzhen 518054, China)

**Abstract:** Formation fracture pressure can be used not only for drilling design, but also for calculation of important parameters such as hydrocarbon sealing height of caprock and ancient pressure coefficient of fluid diapir area. In this study, the logging data of 38 exploration wells in Baiyun deep-water area are analyzed and sorted, the variation trend of mudstone density with buried depth is constructed, the variation trend of normal compacted mudstone density with buried depth is defined as "Three-stage" ( $< 800$ ,  $800-1200$ ,  $> 2200$  m), and the dynamic formula of static rock pressure and Poisson's ratio with depth is fitted. The Eaton method is adopted to establish the chart of formation fracture pressure under different water depths, and the results are in good agreement with the leakage pressure obtained by actual drilling. Using the compiled fracture pressure-depth chart, the calculation method of the maximum hydrocarbon sealing height of the trap caprock in shallow buried area is clarified, and it is confirmed that the thin caprock in deep and ultra-deep water areas still has the hydrocarbon sealing ability. Combined with the study of oil and gas accumulation periods, it is clear that the maximum Paleopressure coefficient in the bottom splitting area around B2 well near the center of Baiyun sag is  $1.69\sim 1.713$ . Through comprehensive analysis, it is speculated that when the pore pressure in the study area reaches about 90% of the fracture pressure of the overlying mudstone, the overpressure system will produce cracks, the mudstone caprock will be damaged and oil and gas leakage will occur.

**Key words:** Pearl River Mouth Basin; Baiyun deep water area; formation fracture pressure; calculation of hydrocarbon sealing height; ancient pressure coefficient