



渤海湾盆地沧东凹陷孔二段一亚段有利岩相及页岩油甜点区优选

宋斯宇¹, 陈世悦¹, 鄢继华¹, 蒲秀刚²

1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580;

2. 中国石油大港油田公司勘探开发研究院, 天津 300280

摘 要: 为了优选出目标层位页岩有利岩相与预测页岩油分布甜点区, 采用主成分分析法(PCA), 对页岩油资源量(滞留烃)、物性(孔隙度、渗透率)、工程性质(脆性指数、岩石力学参数)3 个主地质成分进行分析。结果表明, 纹层状长英质页岩相与纹层状混合质页岩相滞留烃含量高、孔渗性好且脆性指数偏大; 王官屯、七里店以南、沈家铺东南地区为页岩油分布甜点区, 具有较好油气显示。

关键词: 主成分分析法; 滞留烃; 孔隙度; 渗透率; 页岩油甜点区; 渤海湾盆地

FAVORABLE LITHOFACIES AND SWEET SPOT OPTIMIZATION OF THE $E_{k_2}^1$ SHALE OIL IN CANGDONG SAG, BOHAI BAY BASIN

SONG Si-yu¹, CHEN Shi-yue¹, YAN Ji-hua¹, PU Xiu-gang²

1. School of Geosciences and Technology, China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong Province, China;

2. Exploration and Development Research Institute of Dagang Oilfield Plant, CNPC, Tianjin 300280, China

Abstract: To optimize the favorable lithofacies of shale and predict the sweet spots of shale oil distribution in the first sub-member of the second member of Kongdian Formation ($E_{k_2}^1$), the principal component analysis (PCA) is used to analyze three main geological components of shale oil, including resources (retained hydrocarbon), physical properties (porosity and permeability) and engineering properties (brittleness index and rock mechanics parameter). The results show that the lamellar felsic shale facies and lamellar mixed shale facies have high retained hydrocarbon content, with good porosity and permeability, and high brittleness index. Areas such as Wangguantun, south of Qilidian and southeast of Shenjiapu are all sweet spots of shale oil distribution with good oil-gas show.

Key words: principal component analysis; retained hydrocarbon; porosity; permeability; shale oil sweet spot; Bohai Bay Basin

0 引言

随着国内陆相页岩油需求的进一步加大, 页岩油逐渐作为我国原油产量增长的主体, 在松辽盆地、渤海

湾盆地、鄂尔多斯盆地与准噶尔盆地的勘探开发皆取得了一定的进展^[1-6]。然而, 陆相页岩油藏地质条件复杂多样, 存在着沉积相类型多、黏土矿物含量高、原油

收稿日期: 2021-10-14; 修回日期: 2022-01-04. 编辑: 张哲.

基金项目: 国家自然科学基金项目“湖相盆地细粒混合沉积岩形成机理及油气地质意义研究”(编号 41572087).

作者简介: 宋斯宇(1997—), 男, 硕士, 主要从事非常规油气地质学研究, 通信地址 山东省青岛市黄岛区长江西路 66 号, E-mail//2456849377@qq.com

通信作者: 陈世悦(1963—), 男, 博士生导师, 主要从事沉积学、非常规油气地质学研究, 通信地址 山东省青岛市黄岛区长江西路 66 号, E-mail//chenshiyue@vip.sina.com

黏度大、流动性差且压裂效果不佳等诸多问题。为了明确有利岩相与页岩油甜点区优选,急需对页岩油资源量、页岩物性、工程性质等关键问题进行研究,为后期有效勘探开发页岩油奠定基础。

目前采用较多的优选方法有综合信息叠加法、多层次模糊综合分析法、测井曲线分析法等. 对于优选页岩油甜点区, 不同学者在不同的勘探开发阶段采用的方法也有所区别^[7]. 以综合信息叠加法为例, 其通过分析多个地质参数, 如页岩油资源量、总有机碳含量、脆性矿物占比、孔隙度、渗透率及有效页岩纹层厚度等^[8-9], 分析出平面上各参数的最优值, 进行横向与纵向叠加, 最终优选有利勘探区. 此评价手段优点是将各个因素都能涉及且都作为评价指标, 在勘探早期的甜点区优选中起到了较好的效果, 但也存在着如下缺点: 1) 相似的评价因素叠加在一起会影响最终对页岩油甜点整体的评价; 2) 未考虑工程压裂效果, 工程压裂未必与脆性矿物占比有绝对正相关关系, 因此在后期预测中很难起到很好的效果. 多层次模糊综合评价法根据隶属函数将原本定性评价优化为定量评价(视各地质成分为模糊集合), 根据资源甜点、物性甜点、工程甜点的具体评价元素, 建立对应的评价元素集, 给每个评价元素赋予相应的权重, 建立评价矩阵, 最终综合评价甜点. 存在的问题是权重向量的赋值本身存在很大的主观性, 会对后面页岩油定量评价产生一定的误差. 测井曲线分析法利用多类型的测井曲线来计算有机碳含量, 优势是获取资料容易且纵向上数值对比效果明显, 存在的问题是: 1) 相关参数的确定可能会因为井区分布的不同而存在变化, 参数的调整难以确定; 2) 受制于测井本身的限制, 精度相对较低, 与实测数值误差较大.

本研究针对沧东凹陷孔店组二段一亚段($E_{k_2}^1$)的页岩,采用主成分分析(PCA)法,将页岩油资源量(滞留烃)、物性(孔隙度、渗透率)、工程性质(脆性指数、岩石力学参数)定量化分析,进而进行综合评价。其优点是先确定影响页岩油甜点区发育的主要成分,再依次确认每个主成分的主要评价参数(滞留烃、孔渗性、脆性等),且每个主要参数互不影响,最后进行数据标准化分析,优选出页岩油勘探的甜点段/区,为下一步页岩油勘探开发部署提供依据。

1 评价方法

1.1 主地质成分优选

为了保证优选的主地质成分具有代表性,既要反映出页岩油总资源量规模,又要反映页岩油富集的相关地质因素和工程开发的因素^[10].通过从众多参数中优选出合适且准确的参数,最终优选出页岩油资源、物性和工程甜点这3个主地质成分.主成分分析法简化了之前复杂的、多参数的综合信息评价方法,提高了优选甜点区的准确性^[11].

1.2 主成分分析原则

一般来说,当研究问题涉及到多个变量且变量间存在很强相关性的时候,使用主成分分析来对变量进行有效简化.一个主地质成分不能全部代表原来的 p 个影响甜点的变量,所以需要寻找出第二个乃至第三个主地质成分,每个主地质成分之间互相独立(统计上的描述就是让这几个主成分之间的协方差为零).具体确定各个主地质成分的方法如下^[12]:

设 Z_i 表示第 i 个主成分, $i=1,2,3,\cdots, p$, 可设

$$\begin{array}{l} Z_1=c_{11}X_1+c_{12}X_2+\cdots+c_{1p}X_p \\ Z_2=c_{21}X_1+c_{22}X_2+\cdots+c_{2p}X_p \\ \cdots \cdots \cdots \\ Z_p=c_{p1}X_1+c_{p2}X_2+\cdots+c_{pp}X_p \end{array}$$

其中对每一个 i , 均有 $c_{i1}^2 + c_{i2}^2 + c_{i3}^2 + \cdots + c_{ip}^2 = 1$

1.3 分析影响主地质成分的变量

找出影响主地质成分的变量且对其分析是解决页岩油优选甜点区问题的关键. 发现页岩油有效开采的重点并不完全在于页岩中的总含油量, 而在于在通过工业手段可开采的滞留烃. 滞留烃可表征地层中可动烃的富集程度, 用其作为表示资源甜点的主要成分; 渗透率反映页岩油在地层中的渗流能力, 孔隙度反映地层中页岩油的储集能力, 两者是决定储层物性的主变量; 杨氏模量与泊松比反映页岩的可压裂性, 是表征工程性质的主成分^[13].

1.4 确定主成分权重

主成分权重的合理划分直接影响着有利岩相预测的精确性^[14]。由于页岩较强的非均质性,页岩不同部分地质成分存在着较大的差异,其对应的权重也有差异。页岩滞留烃越大,孔隙度、渗透率越高,杨氏模量越好,越有利于页岩油甜点预测。赋予滞留烃、杨氏模量权重略大,两者分别关系到页岩可以流动烃的含量

以及压裂条件好坏。

2 研究区地质概况

渤海湾盆地沧东凹陷在孔二段沉积时期为淡水-半咸水封闭型拗陷湖盆沉积,沉积相带沿湖盆区呈环带状展布,外环发育为三角洲前缘的常规砂岩,内环发育大面积分布的页岩。优质烃源岩发育较多,为良好的页岩油有利岩相区,占地面积约为 750 km², Ek₂¹ 厚度为 40~120 m^[15-16]。孔二段独具特色的闭塞湖盆沉积模式造就了凹陷级常规-非常规油气一体有序成藏的格局,其中研究层段 Ek₂¹ 具有明显页岩油特征,源储一体,储集层为细粒非砂岩型混合沉积岩,烃类多为原地聚集^[17]。烃源岩品质优,总有机碳含量(TOC)高,平均 3.6%,最高可达 12.92%,生烃潜量高,平均 18.9×10⁻³,游离烃含量平均 3.5×10⁻³;页岩纹层结构十分发育,显微镜下观察到碳酸盐、方沸石、长英质等纹层纵向频繁叠置;脆性矿物含量高,广义脆性指数 70 以上,有利于压裂形成复杂裂缝网络。截至目前,沧东凹陷孔二段已有 75 余口井钻遇 Ek₂¹ 页岩层系,且多有油气显示,15 口井取得了工业性油流。官东地区(孔东断层以东地区)已经成为亿吨量级储备场所,具有可观的勘探前景^[18](图 1)。

3 表征主地质成分

3.1 页岩油资源量——滞留烃

页岩油中滞留烃有两种赋存形式:游离态与吸附态。游离烃主要赋存于粒间孔、有机质孔和微裂缝中,为目前工业水平下可以有效开采并加以利用的部分;吸附烃主要吸附在干酪根表面与黏土矿物内部^[20]。在页岩饱和和吸附状态下,游离烃为页岩滞留烃与吸附烃的差值。当前技术条件下尚不能利用吸附烃资源,因此明确游离烃含量至关重要。考虑轻烃与重烃散失的部分所占的含量,文献[21]提出轻、重烃损失含量恢复,因此表征页岩滞留烃含量的常见的计算公式为:

$$Q_a = K_a A \quad (1)$$

$$Q_s = (1 + K_{s1})S_1 + K_{s2}S_2 \quad (2)$$

式中: Q_a 为氯仿沥青“A”含量计算的滞留烃质量分数(%); K_a 为氯仿沥青“A”的轻烃恢复系数; A 为氯仿沥青“A”测量数据; Q_s 为热解参数计算的滞留烃的质

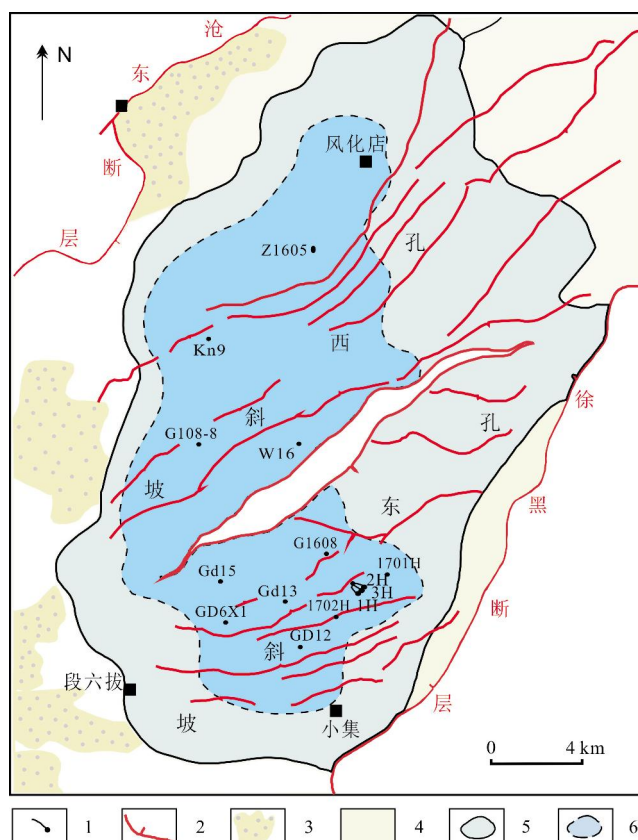


图 1 渤海湾盆地沧东凹陷孔二段页岩沉积有利区
(据文献[19])

Fig. 1 Favorable sedimentary areas of the Ek₂ shale in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin
(From Reference [19])

1—井轨迹 (well trajectory); 2—断层 (fault); 3—三角洲前缘 (delta front); 4—前三角洲 (prodelta); 5—滨浅湖 (shore-shallow lake); 6—半深湖 (semi-deep lake)

量分数(%); S_1 、 S_2 为热解烃含量(10⁻³); K_{s1} 为热解轻烃散失系数; K_{s2} 为热解 S_2 中重烃比例系数。

页岩吸附烃的计算公式为:

$$S_p = p_o x_o + \gamma \sum_{i=1}^n p_i x_i \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{S}{S_0} = \left(\frac{\phi}{\phi_0} \right)^{2/3} \quad (4)$$

式中: S_p 为页岩油吸附烃含量 (10⁻³); p_o 为有机质在页岩中所占比例; x_o 为有机质吸附潜量(10⁻³); γ 为页岩比表面积相关系数; p_i 为第 i 种矿物在页岩中所占比例; x_i 为第 i 种矿物的吸附潜量(10⁻³); S_0 、 S 为孔隙压实前比表面积和压实后比面积(m²/g); ϕ 、 ϕ_0 为页岩当前孔隙度和原始孔隙度。

前人^[22]针对低孔低渗页岩提出了评价页岩滞留烃含量的含油饱和度指数 S_i/TOC , 提出 S_i/TOC 大于 100 时页岩层段为有利的页岩油产出层段, 此地化参数法减小了热演化作用的影响. 受样品数量、取样深度、温度、实验成本等多种因素影响, 实测的地化参数 (S_i 和 TOC) 不易准确表征页岩中滞留烃的纵向分布, 故借助测井手段. 测井信息具有较高分辨率、连续性强且容易获取资料等优点, 由于有机质对声波时差与密度测井曲线有较好的响应, 使用改进的 ΔIgR 模型来预测 TOC , 可以进一步验证计算的滞留烃的准确性 (图 2).

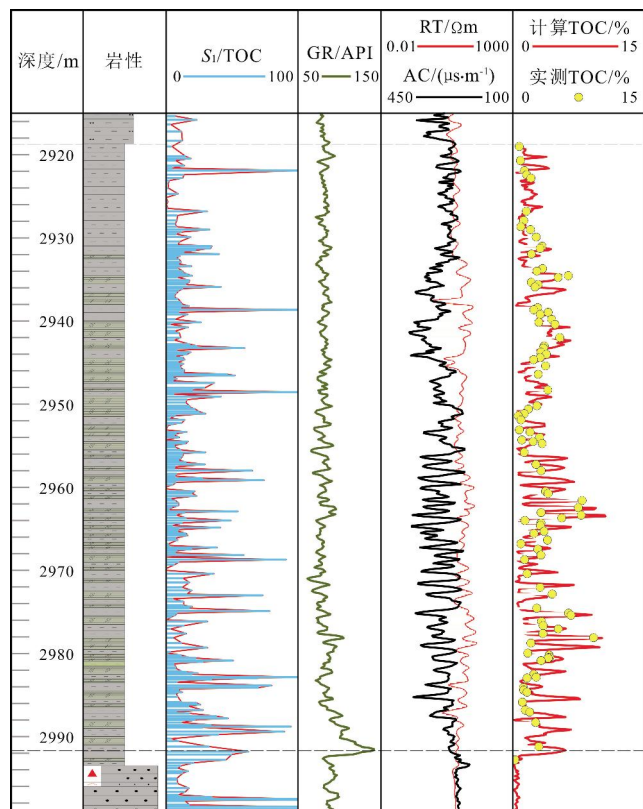


图2 官108-8井孔二段一亚段 S_i/TOC 与预测 TOC 对比图

Fig. 2 Comparison of surveyed S_i/TOC and predicted TOC of Ek_2^1 in G108-8 well

3.2 物性——孔渗性

页岩孔渗强弱既反映了页岩储油能力又能反映渗流能力, 尽管页岩表现出低孔、低渗的特征, 但常规孔隙度、渗透率的研究是后续储层物性研究的基础, 因此对其研究也十分重要. 页岩常规岩石分析测试需要在 99~116 °C 的完全干燥环境下进行^[23].

通过对官东 12 井 55 个样品、官东 14 井 61 个样

品分析 (如图 3) 可知, 孔二段一亚段页岩物性普遍较差. 孔隙度呈正偏态分布, 主要分布在 0.01%~4%, 平均孔隙度为 2.25%; 渗透率差异性较大, 主要集中在 0.01~1 mD, 平均渗透率为 0.25 mD. 总体而言, 研究区页岩具有强非均质性、低孔且低渗的特点.

3.3 工程性质

页岩密度大, 本身具有极低的基质孔隙度和渗透率. 为了优选出工程甜点, 需要着重研究岩石脆性, 脆性是决定可否进行大规模压裂的关键参数. 页岩脆性评价方法主要有根据页岩矿物含量计算的脆性指数 (脆性矿物与全部矿物的比值) 和根据岩石力学参数计算的杨氏模量、泊松比^[24].

3.3.1 脆性指数方法

根据矿物性质将页岩中矿物组分为 4 个部分, 分别为长英质矿物 (石英和长石)、碳酸盐矿物 (方解石和白云石)、黏土矿物与方沸石 (孔二段方沸石早期由黏土矿物在成岩转化而来)^[25]. 需要注意的是, 方沸石作为沧东凹陷孔二段重要的矿物组分, 对页岩储集性能有着一定的影响. 前人研究忽略了方沸石含量对岩石脆性的影响^[26]. 因此, 本文在以往研究的基础上加入方沸石的脆性指数计算, 即

$$BI = \frac{C_{\text{长英质}} + C_{\text{碳酸盐}}}{C_{\text{黏土}} + C_{\text{长英质}} + C_{\text{碳酸盐}} + C_{\text{方沸石}}} \quad (5)$$

式中: BI 为岩石脆性指数; $C_{\text{长英质}}$ 为长石与石英的质量分数之和 (%); $C_{\text{碳酸盐}}$ 为方解石与白云石的质量分数之和 (%); $C_{\text{方沸石}}$ 为方沸石质量分数 (%); $C_{\text{黏土}}$ 为所有黏土矿物质量分数之和 (%).

通过对官 108-8 井 249 个 XRD 测试点、官东 14 井 114 个 XRD 测试点分析 (如图 4 所示), 沧东凹陷孔二段一亚段脆性矿物整体呈现负偏态分布, 官东地区 (官东 14 井) Ek_2^1 脆性指数 80%~99%, 平均脆性约为 90.58%; 官西地区 (官 108-8 井) Ek_2^1 脆性指数 60%~80%, 平均脆性为 67.17%. 总体而言, 研究区脆性矿物占比较大, 页岩可压裂性较强.

3.3.2 岩石力学参数

页岩力学性质决定着页岩在压裂改造期间裂缝的开展和展布形态, 其中杨氏模量越大、泊松比越低压裂效果越好^[27]. 本次研究选取了官东地区 (官东 14 井) 孔二段一亚段的 8 块岩样进行三轴力学实验 (如表 1), 在中国石油大学 (华东) 山东省油气储运安全重点

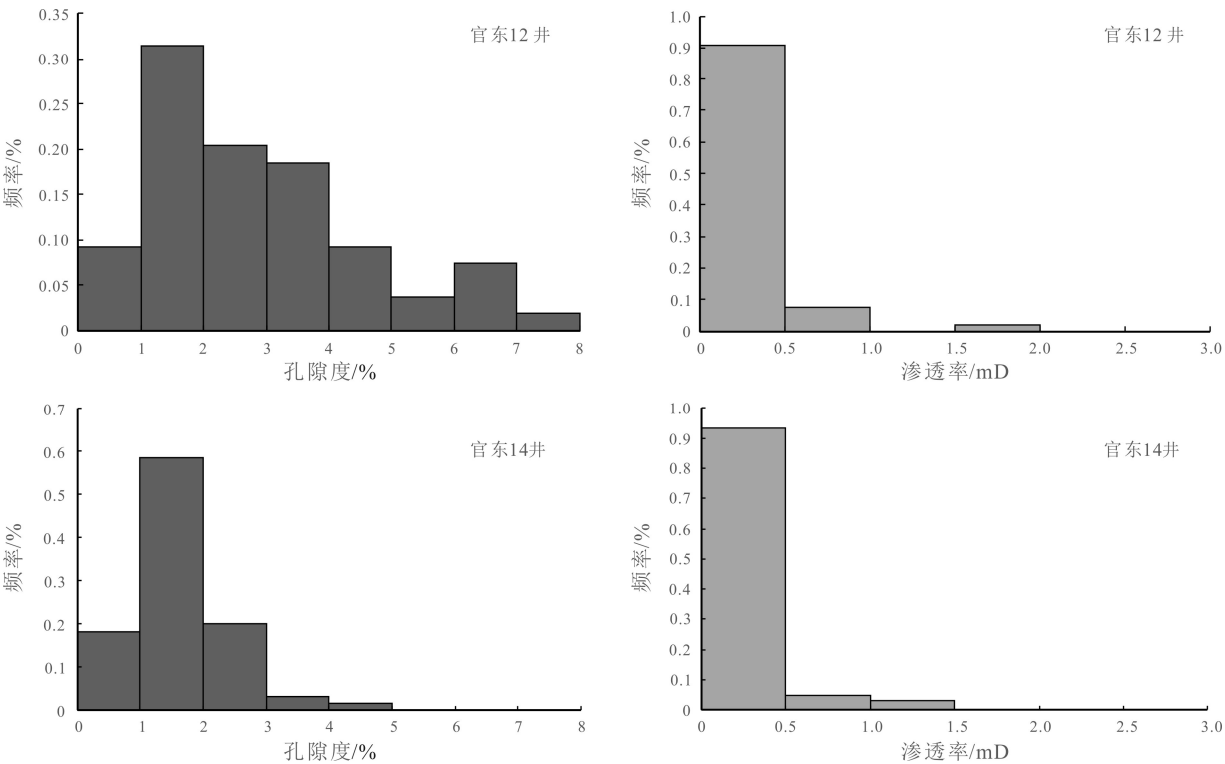


图 3 沧东凹陷孔二段一亚段页岩孔隙度、渗透率分布直方图

Fig. 3 Distribution histograms of porosity and permeability for the Ek_2^1 shale in Cangdong Sag

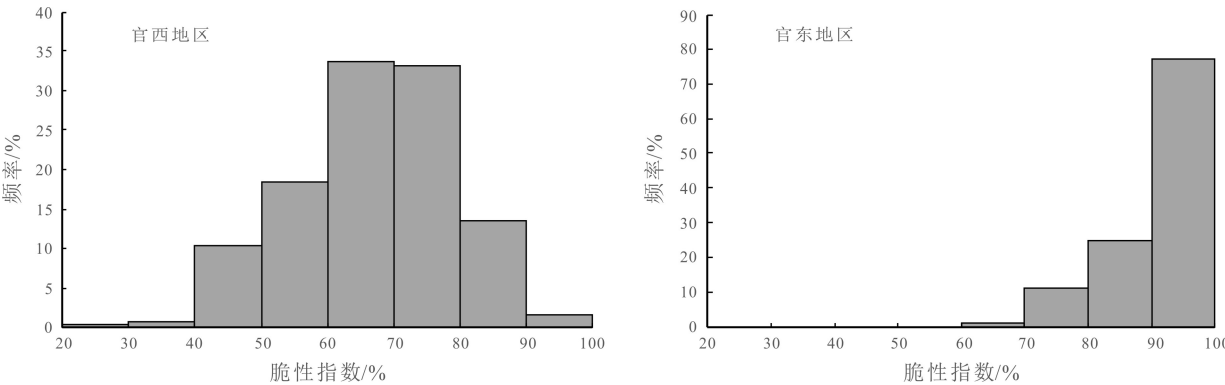


图 4 沧东凹陷孔二段一亚段脆性指数分布直方图

Fig. 4 Distribution histograms of brittleness index for Ek_2^1 in Cangdong Sag

实验室进行测试. 通过比较静态三轴压力测试结果可知: 1)泊松比分布较为相近且集中,差异较小,大多都分布在 0.2 附近; 2)不同测试点间的杨氏模量差异较大,两者都作为影响页岩力学性质的主要因素; 3)随着围压的增加,抗压强度增长率逐渐降低,后期逐渐趋于平缓,预测当围压增大到特定值时,抗压强度会维持不变甚至会有一定的降低(页岩的抗压强度均有一极限值). 抗压强度是用来表征页岩力学特征的关键参数(图 5).

4 页岩油甜点层系优选

通过对沧东凹陷孔二段一亚段的官东地区(官东 14 井)与官西地区(官 108-8 井)分析,运用主成分分析法,绘制出页岩油甜点层段综合评价图(图 6).

沧东凹陷孔二段一亚段页岩油重点层段纵向分布特征如图 6 所示,甜点段主要取决于页岩滞留烃含量、孔隙度、渗透率与脆性指数. 其中官西地区的官 108-8 井的地质甜点段在 2 930~2 942 m 与 2 953~2 966 m,累计厚度约为 25 m,该甜点段主要发育纹层状长英质页

表 1 页岩样品三轴力学实验结果

Table 1 Triaxial mechanical test results of shale samples

样品编号	密度/(g/cm ³)	围压/MPa	抗压强/MPa	泊松比	杨氏模量/GPa
工 1-1	2.53	5	—	—	—
工 1-2	2.54	15	92.49	0.252	19.53
工 1-3	2.54	25	180.52	0.268	31.55
工 1-4	2.53	35	220.05	0.222	30.07
工 2-1	2.37	5	132.75	0.2	23.98
工 2-2	2.39	15	230.11	0.24	22.48
工 2-3	2.44	25	262.21	0.214	27.42
工 2-4	2.47	35	288.63	0.218	29.21

岩相与块状长英质页岩相;位于官东地区的官东 14 井的甜点段在 4 080~4 089 m 与 4 099~4 112 m, 累计厚度约为 32 m, 该甜点段主要发育纹层状长英质页岩相、纹层状混合质页岩相与块状长英质页岩相. 综合分析可知, 官东 14 井与官 108-8 井的甜点层段均含油迹与高 TOC 值.

在以往优选页岩油甜点区的研究中, 一个关键要素为页岩油资源量(滞留烃), 具有一定规模的滞留烃是确保可以达到经济开采的首要前提. 本研究基于主成分分析法, 统计了 40 多口井的相关数据, 通过对研究区滞留烃、孔渗性、脆性指数与岩石力学性质的整体

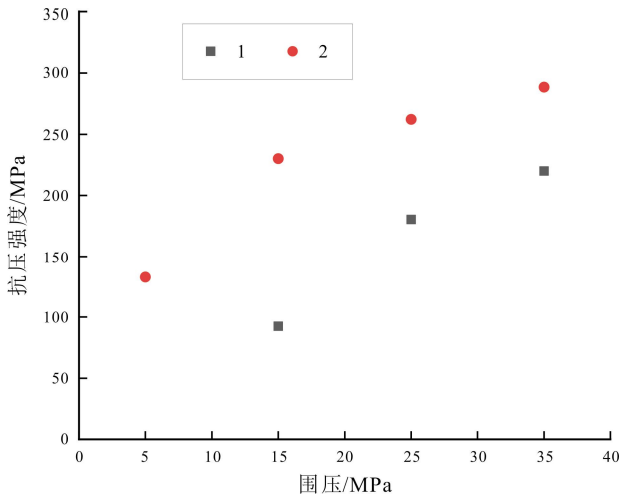


图 5 抗压强度随围压变化图

Fig. 5 Variation of compressive strength with confining pressure

1—官东 14 井(GD-14 well); 2—官东 12 井(GD-12 well)

分析后识别出甜点区(图 7), 主要位于七里店、沈家铺东南地区与王官屯地区附近.

5 结论

通过对页岩油资源量(滞留烃)、物性(孔隙度与渗透率)、工程性质(脆性指数与力学参数)3 个主地质成分的评价, 构建了渤海湾盆地沧东凹陷湖相页岩油甜点主成分分析方法, 识别了沧东凹陷孔二段一亚段勘探开发有利层段/甜点区. 沧东凹陷的甜点区主要位于王官屯、七里店以南、沈家铺东南地区.

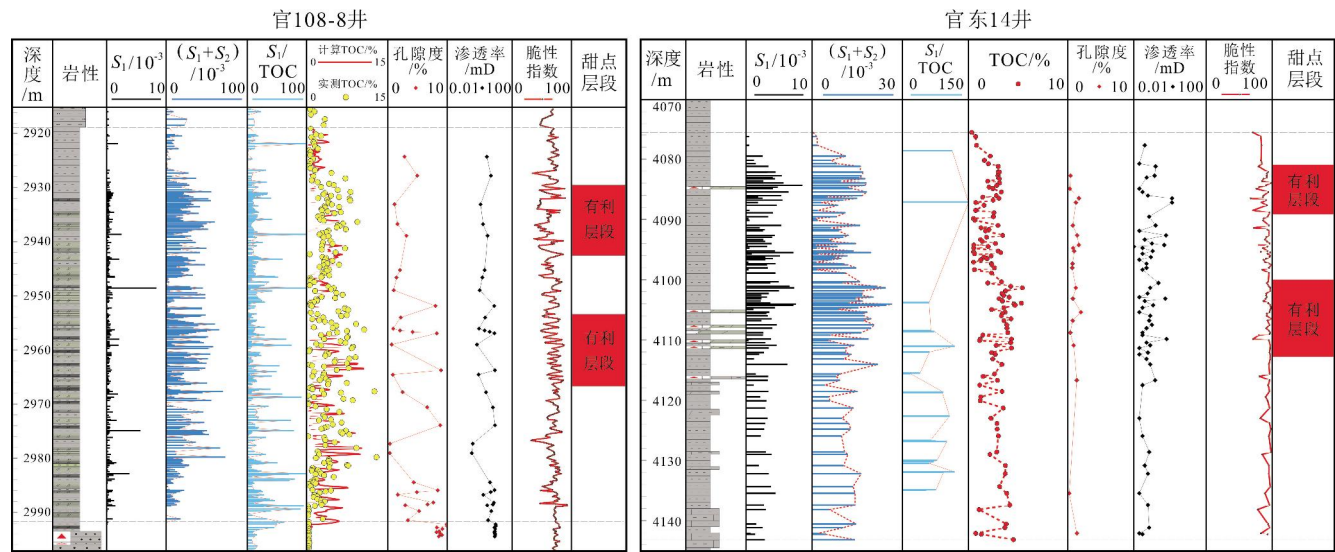


图 6 孔二段一亚段官 108-8 井、官东 14 井页岩油甜点段综合评价

Fig. 6 Comprehensive evaluation of the E_{k2}¹ shale oil sweet spot sections in G108-8 and GD-14 wells

- [13]夏遵义, 马海洋, 房堃. 渤海湾盆地沾化凹陷陆相页岩储层岩石力学特征及可压裂性研究[J]. 石油实验地质, 2019, 41(1): 134-141.
- Xia Z Y, Ma H Y, Fang K. Rock mechanical properties and fracability of continental shale in Zhanhua sag, Bohai Bay basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(1): 134-141.
- [14]师政. 南堡凹陷及周边凸起古岩溶作用特征及发育模式研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.
- Shi Z. The research on palaeokarst characteristics and development model in Nanpu sag and surrounding uplift [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2016.
- [15]周立宏, 蒲秀刚, 肖敦清, 等. 渤海湾盆地沧东凹陷孔二段页岩油形成条件及富集主控因素[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(9): 1323-1332.
- Zhou L H, Pu X G, Xiao D Q, et al. Geological conditions for shale oil formation and the main controlling factors for the enrichment of the 2nd member of Kongdian Formation in the Cangdong sag, Bohai Bay basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(9): 1323-1332.
- [16]李洪香, 马红. 黄骅坳陷云质岩类致密油形成条件与勘探方向[J]. 特种油气藏, 2015, 22(5): 18-22.
- Li H X, Ma H. Forming conditions and exploration direction of dolomitic tight oil in Huanghua depression[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(5): 18-22.
- [17]李凤霞, 高勇, 汪津, 等. 沧东凹陷孔二段常非一体化成藏研究与实践[J]. 录井工程, 2019, 30(2): 95-99, 136-137.
- Li F X, Gao Y, Wang J, et al. Research and practice on integrated hydrocarbon accumulation of conventional and unconventional oil and gas reservoirs in Member 2 of Kongdian Formation in Cangdong sag [J]. Mud Logging Engineering, 2019, 30(2): 95-99, 136-137.
- [18]蒲秀刚, 金凤鸣, 韩文中, 等. 陆相页岩油甜点地质特征与勘探关键技术——以沧东凹陷孔店组二段为例[J]. 石油学报, 2019, 40(8): 997-1012.
- Pu X G, Jin F M, Han W Z, et al. Sweet spots geological characteristics and key exploration technologies of continental shale oil: A case study of Member 2 of Kongdian Formation in Cangdong sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(8): 997-1012.
- [19]韩文中, 赵贤正, 金凤鸣, 等. 渤海湾盆地沧东凹陷孔二段湖相页岩油甜点评价与勘探实践[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(4): 777-786.
- Han W Z, Zhao X Z, Jin F M, et al. Sweet spots evaluation and exploration of lacustrine shale oil of the second member of Paleogene Kongdian Formation in Cangdong sag, Bohai Bay basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(4): 777-786.
- [20]赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 湖相页岩滞留烃形成条件与富集模式——以渤海湾盆地黄骅坳陷古近系为例[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(5): 856-869.
- Zhao X Z, Zhou L H, Pu X G, et al. Formation conditions and enrichment model of retained petroleum in lacustrine shale: A case study of the Paleogene in Huanghua depression, Bohai Bay basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 856-869.
- [21]朱日房, 张林晔, 李政, 等. 陆相断陷盆地页岩油资源潜力评价——以东营凹陷沙三段下亚段为例[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(1): 129-136.
- Zhu R F, Zhang L Y, Li Z, et al. Evaluation of shale oil resource potential in continental rift basin: A case study of Lower Es3 Member in Dongying sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(1): 129-136.
- [22]Jarvie D M, Jarvie B M, Weldon D, et al. Components and processes impacting production success from unconventional shale resource systems[J/OL]. Search and Discovery Article #40908, 2012.
- [23]姜南. 鄂尔多斯盆地合水地区长 7 油层组含油富集区优选[D]. 西安: 西北大学, 2017.
- Jiang N. Oil enrichment area optimization of Chang 7 reservoir in Heshui area, Ordos basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2017.
- [24]郭同翠, 姜明军, 纪迎章, 等. 叠前地质统计学反演在页岩甜点和薄夹层预测中的应用——以西加拿大盆地 W 区块为例[J]. 石油地球物理勘探, 2020, 55(1): 167-175.
- Guo T C, Jiang M J, Ji Y Z, et al. The application of prestack geostatistical inversion in the prediction of shale sweet spots and thin interbeds: A case study of Block W in Western Canada Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(1): 167-175.
- [25]鄢继华, 蒲秀刚, 周立宏, 等. 基于 X 射线衍射数据的细粒沉积岩岩石定名方法与应用[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(1): 48-54.
- Yan J H, Pu X G, Zhou L H, et al. Naming method of fine-grained sedimentary rocks on basis of X-ray diffraction data [J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(1): 48-54.
- [26]李珊珊. 辽河油田致密油气勘探现状分析[J]. 内蒙古石油化工, 2015, 41(10): 61-64.
- Li S S. Analysis on the current situation of tight oil and gas exploration in Liaohe oilfield [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2015, 41(10): 61-64. (in Chinese)
- [27]张敏. 致密油藏体积压裂水平井缝网设计及效果评价[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
- Zhang M. Design optimization and performance estimation of volume fracturing horizontal well in tight oil reservoir[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.