

引用: 田明智, 朱超, 李森明, 等. 湖相碳酸盐岩测井岩相识别技术与应用: 以柴达木盆地英西地区为例 [J]. 中国石油勘探, 2023, 28(1): 135-143.

Tian Mingzhi, Zhu Chao, Li Senming, et al. Application of logging lithofacies identification technology of lacustrine carbonate rocks: a case study of Yingxi area, Qaidam Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(1): 135-143.

湖相碳酸盐岩测井岩相识别技术与应用 ——以柴达木盆地英西地区为例

田明智¹ 朱超¹ 李森明¹ 夏志远¹ 宋光永¹ 王艳清¹ 宫清顺¹ 李亚锋² 刘占国¹

(1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油青海油田公司)

摘要: 我国湖相碳酸盐岩储层分布广泛, 具有极大的油气勘探前景。但该类储层陆源碎屑含量高、岩相种类多, 导致岩相识别困难且严重制约了该领域勘探拓展和高效开发, 这在埋藏深度普遍大于 4000m 的柴达木盆地英西地区古近系下干柴沟组上段 (E_3^2) 尤为典型。以英西地区为例, 充分利用区内大量岩心、薄片和实验分析资料, 系统分析湖相碳酸盐岩岩相特征及测井响应特征, 并建立了识别方法和图版。分析结果表明, 英西地区 E_3^2 发育颗粒灰云岩、泥晶灰云岩、纹层状灰云岩、泥质膏岩和灰云质泥岩等 5 种类型的岩相。基于测井响应特征分析, 确定自然伽马、骨架密度、体积密度为岩相识别敏感参数, 进而首次提出岩石结构因子 (RFF) 技术; 利用计算得到的 RFF 参数, 结合元素测井资料建立了岩相识别图版, 将其应用于研究区 48 口井, 在 12 口取心井中岩相解释平均符合率达到 80.2%, 应用效果较好。岩石结构因子技术提高了湖相碳酸盐岩岩相识别符合率, 对研究储层分布规律、指导勘探开发具有重要意义。

关键词: 柴达木盆地; 湖相碳酸盐岩; 岩相识别; 测井评价

中图分类号: P631.8

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-7703.2023.01.012

Application of logging lithofacies identification technology of lacustrine carbonate rocks: a case study of Yingxi area, Qaidam Basin

Tian Mingzhi¹, Zhu Chao¹, Li Senming¹, Xia Zhiyuan¹, Song Guangyong¹, Wang Yanqing¹, Gong Qingshun¹,
Li Yafeng², Liu Zhanguo¹

(1 PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology; 2 PetroChina Qinghai Oilfield Company)

Abstract: In China, lacustrine carbonate rocks are widely distributed and show great prospects for petroleum exploration. The high-content terrigenous debris and diversified lithofacies lead to great difficulty in identifying lithofacies and severely restrict the exploration expansion and efficient development in this field, which is typically represented by the upper part of the Paleogene Lower Ganchaigou Formation (E_3^2) in Yingxi area in Qaidam Basin with a burial depth of greater than 4000 m. Therefore, a large number of core data, thin section and experimental analysis data in Yingxi area are studied in detail, and lithofacies and logging response characteristics of lacustrine carbonate rocks are systematically analyzed to establish the lithofacies identification method and chart. The study results show that five types of lithofacies are identified in E_3^2 in Yingxi area, including granular lime-dolostone, micrite lime-dolostone, laminated lime-dolostone, argillaceous gypsum

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司“十四五”前瞻性项目“柴达木盆地页岩油勘探开发理论与关键技术研究”(2021DJ1808), “多类型储集体发育机制与储集能力定量评价技术研究”(2021DJ0402)。

第一作者简介: 田明智 (1990-), 男, 黑龙江大庆人, 硕士, 2012 年毕业于中国石油大学 (北京), 工程师, 现主要从事沉积储层研究及测井评价方面的工作。地址: 浙江省杭州市西湖区西溪路 920 号中国石油杭州地质研究院, 邮政编码: 310023。E-mail: tianmz_hz@petrochina.com.cn

通信作者简介: 刘占国 (1980-), 男, 河北承德人, 硕士, 2004 年毕业于江汉石油学院, 高级工程师, 现主要从事沉积储层研究及测井评价方面的工作。地址: 浙江省杭州市西湖区西溪路 920 号中国石油杭州地质研究院, 邮政编码: 310023。E-mail: tianmz_hz@petrochina.com.cn

收稿日期: 2021-12-21; 修改日期: 2022-10-26

and lime-dolomitic mudstone. The analysis of logging response characteristics indicates that GR, matrix density and bulk density are sensitive parameters for lithofacies identification, and rock fabric factor (*RFF*) technology is proposed for the first time. The calculated *RFF* and element logging data are integrated to establish the lithofacies identification chart, which is applied to 48 wells in the study area. The average coincidence rate of lithofacies interpretation reaches up to 80.2% in 12 coring wells, showing good application results. *RFF* technology supports to improve the lithofacies identification accuracy of lacustrine carbonate rocks, and is of great significance to determine the reservoir distribution law and guide the petroleum exploration and development in practice.

Key words: Qaidam Basin, lacustrine carbonate rocks, lithofacies identification, logging evaluation

0 引言

湖相碳酸盐岩储层在我国东西部含油气盆地普遍发育,近年来相继获得诸多重大发现,展示出极大的油气资源潜力和勘探前景^[1-14]。然而,勘探实践表明,该类碳酸盐岩储层多具组构复杂、非均质性强、陆源碎屑含量高及分布时空变化快等特点,岩相识别困难,制约了勘探规模拓展和高效开发,储层成储机制和分布规律需要深化研究。

目前,采用测井资料识别碳酸盐岩岩性或岩相的方法主要包括曲线特征定性分析、交会图法、视岩石结构数法及相关数学分析方法。曲线特征定性分析主要是根据不同岩石的测井响应特征、曲线形态、测量值大小和图像特征来识别岩相^[15-16],这类方法只能对岩性进行描述,无法精细刻画;交会图法主要通过自然伽马、声波时差、密度、中子和光电吸收截面指数等参数之间两两交会来定性区分岩相^[17],这种方法操作简单,但不能定量识别岩相;视岩石结构数法是基于岩心和测井曲线,根据测井特征划分不同地层模型并构建计算公式的一种方法^[18],该方法在海相碳酸盐岩地层应用效果较好,在陆源碎屑含量较高的湖相碳酸盐岩地层应用效果较差;识别岩相的数学方法主要包括神经网络^[19]、聚类分析^[20]、主成分分析^[21]、灰色关联^[22]、支持向量机法^[23]和朴素贝叶斯法^[24]等,通过结合测井资料对岩石类型进行区分。

本文运用大量岩心、薄片及测井数据,系统研究了柴达木盆地英西地区碳酸盐岩储层岩相和测井响应特征,提出了以岩石结构因子技术为核心的测井岩相识别方法,在有利储集体分布预测方面,对井位部署和油藏评价具有重要意义。

1 区域地质概况

英西地区位于柴达木盆地英雄岭构造带西端(图1),新生界沉积地层发育齐全,自下而上依次为古近系路乐河组(E_{1+2})、下干柴沟组(E_3),新近系上干柴沟组(N_1)、下油砂山组(N_2^1)、上油砂山组(N_2^2)、狮子沟组(N_2^3),以及第四系七个

泉组(Q_{1+2})(图2)。下干柴沟组上段(E_3^2)沉积时期,在干旱的古气候背景下,由早至晚整体上经历了半咸化、咸化和盐湖3个完整的咸化湖盆沉积演化阶段^[25-26]。下干柴沟组上段沉积早期(VI油组沉积期)为半咸化阶段,物源补给较强,盐度较低,为深湖—半深湖沉积环境,以暗色(含灰/灰质)泥岩沉积为主,为区内主力烃源岩发育期;中期(V—IV油组沉积期)为咸化阶段,在物源间歇性补给和强蒸发作用下,盐度总体较高,水深在半深湖—滨浅湖范围内高频振荡演化,是混积碳酸盐岩储层集中发育期;晚期为(III—I油组沉积期)盐湖阶段,物源补给最弱,蒸发作用强烈,发育多个湖水蒸发浓缩至干盐湖的沉积旋回,以蒸发岩类沉积为主,储层次之,为区域优质盖层发育期(图3)。英西地区下干柴沟组上段已提交三级储量 1.2×10^8 t,勘探潜力较大。

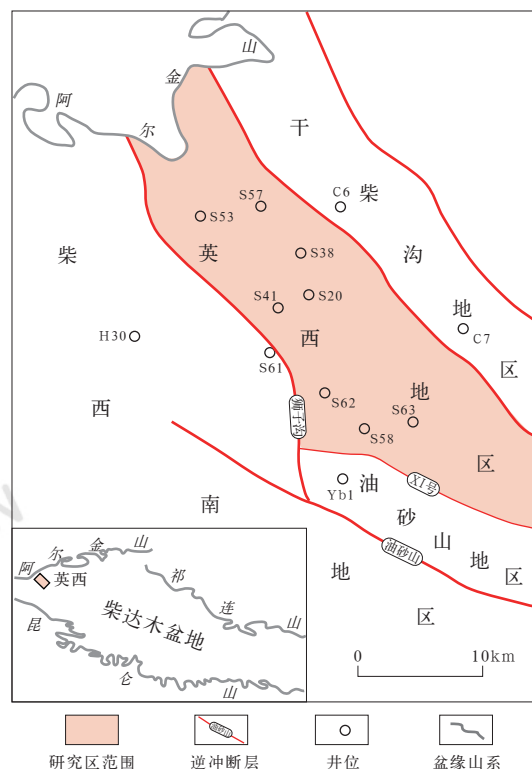


图1 英西地区构造位置图

Fig.1 Tectonic location of Yingxi area in Qaidam Basin

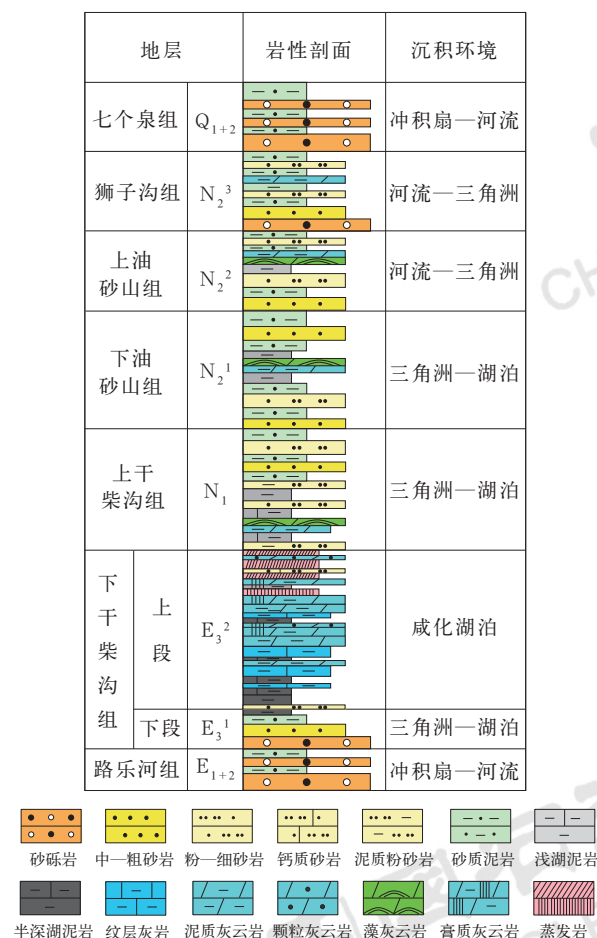


图 2 英西地区新生界沉积地层概况

Fig.2 Overview of the Cenozoic stratigraphy in Yingxi area

2 岩相类型

英西地区湖相碳酸盐岩包含陆源碎屑、碳酸盐和蒸发盐三大类岩矿组分，混积特征显著，岩性总体上以细粒混积的泥质灰云岩为主，次为颗粒灰云岩。通过对区内大量岩心、薄片观察发现，该套湖相碳酸盐岩呈现出不同的岩石结构特征、矿物组成和形成环境，据此对英西地区储层进行岩相学划分，识别出 5 种岩相类型，分别为颗粒灰云岩、泥晶灰云岩、纹层状灰云岩、泥质膏岩和灰云质泥岩。其中颗粒灰云岩和泥晶灰云岩是主要的储层，纹层状灰云岩是优质烃源岩。

2.1 颗粒灰云岩

发育于水动力较强的水下低隆的顶部和斜坡带上部，为浅水高能滩沉积，岩心上可见交错层理；镜下表现为亮晶混积颗粒结构，颗粒主要为细—粉砂级碳酸盐碎屑，不含膏时低角度交错层理发育，含膏时层理被破坏，呈斑状结构，也可见碎屑形成表皮鲕（图 4a、b）。

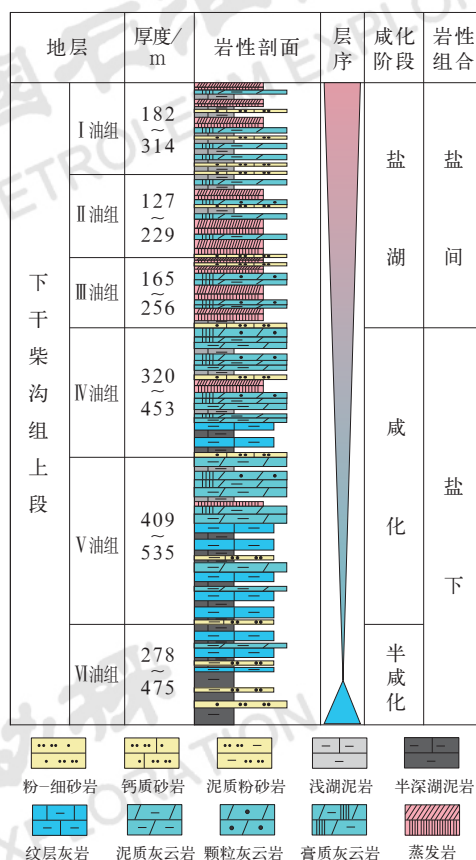


图 3 英西地区下干柴沟组上段沉积地层概况

Fig.3 Stratigraphic column of Lower Ganchaigou

Formation in Yingxi area

2.2 泥晶灰云岩

发育于水动力较弱的斜坡带中部，为较浅水低能稳定碳酸盐化学沉积，岩心上为相对均质的块状混积结构，成分主要为泥晶碳酸盐，次为泥质，不含膏时水平层理可见，含膏时层理被破坏，呈斑状结构；薄片下碳酸盐与陆源碎屑和黏土混合形成泥晶结构（图 4c）。

2.3 纹层状灰云岩

沉积环境为较深水韵律补给的安静水体，为较深水韵律补给安静水体沉积，岩心上具有似页岩结构特征，薄片下呈典型的纹层状，主要由暗色含灰泥—粉砂质陆源碎屑纹层和纯碳酸盐纹层叠加形成，纯碳酸盐纹层由他形方解石晶粒构成，粒度一般为 0.03~0.06mm（图 4d）。

2.4 泥质膏岩

为浅水低能蒸发岩沉积，成分以硬石膏为主，次为泥质和碳酸盐，硬石膏在岩心上呈雪花状—层状，镜下呈雪花状或斑状（图 4e）。

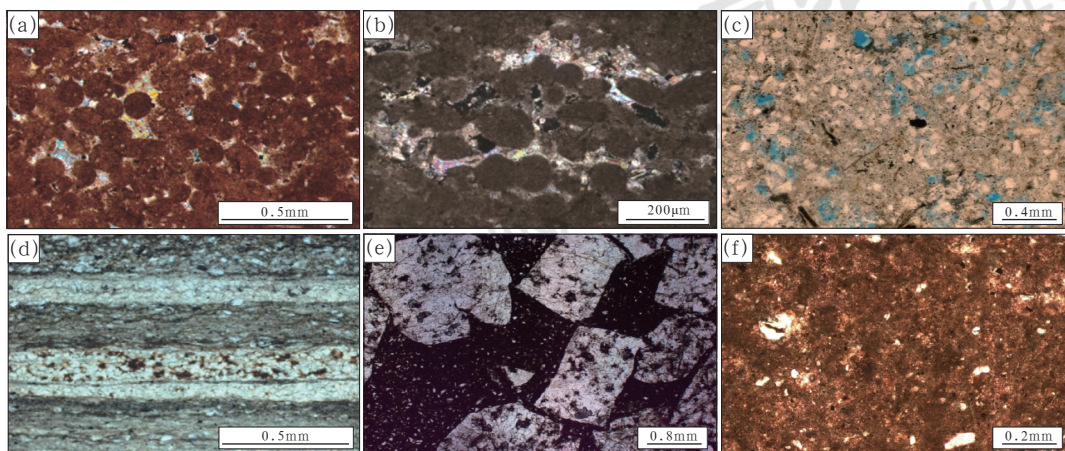


图4 英西地区下干柴沟组5种岩相薄片图版

Fig.4 Thin section plates of five types of lithofacies of Lower Ganchaigou Formation in Yingxi area

(a) 颗粒灰云岩, S41-6-1井, 3868.57m, 岩石薄片, 正交光; (b) 颗粒灰云岩, S43井, 3922.77m, 岩石薄片, 正交光; (c) 泥晶灰云岩, S41-6-1井, 3854.87m, 铸体薄片, 单偏光; (d) 纹层状灰云岩, S41-6-1井, 3865.80m, 岩石薄片, 正交光; (e) 泥质膏岩, S41-2井, 4154.13m, 岩石薄片, 单偏光; (f) 灰云质泥岩, S41-2井, 4148.90m, 岩石薄片, 单偏光

2.5 灰云质泥岩

发育于水动力最弱的深水洼槽内, 为较深水陆源快速补给沉积, 成分主要为泥质, 次为泥晶碳酸盐, 水平层理不明显, 部分含斑状硬石膏, 呈块状结构 (图4f)。

3 岩相测井响应特征与敏感参数

3.1 测井响应特征

不同类型的岩相由于矿物成分和岩石结构的不同, 测井响应存在一定差别。自然伽马曲线能够较好地反映泥质含量的变化, 体积密度与骨架密度可分别反映孔隙发育情况和岩石骨架特征。从测井响应特征来看 (图5), 自然伽马、体积密度和骨架密度曲线对

岩相的变化比较敏感, 可用于识别岩相。

3.2 元素测井矿物成分特点

由于不同岩相的矿物组成和含量不同, 元素测井所计算的矿物成分可较好地反映这种差异 (图6)。颗粒灰云岩的碳酸盐矿物含量最高, 以白云石为主; 泥晶灰云岩碳酸盐含量次之, 部分含少量硬石膏; 纹层状灰云岩陆源碎屑与碳酸盐含量基本相当; 灰云质泥岩黏土矿物含量最高; 泥质膏岩则含有大量硬石膏。

3.3 岩相敏感参数

综合自然伽马、体积密度、骨架密度等敏感参数信息, 可以获得英西地区5种岩相的测井响应特征图版 (图7), 并基于这些敏感参数对岩相进行量化的精细识别。

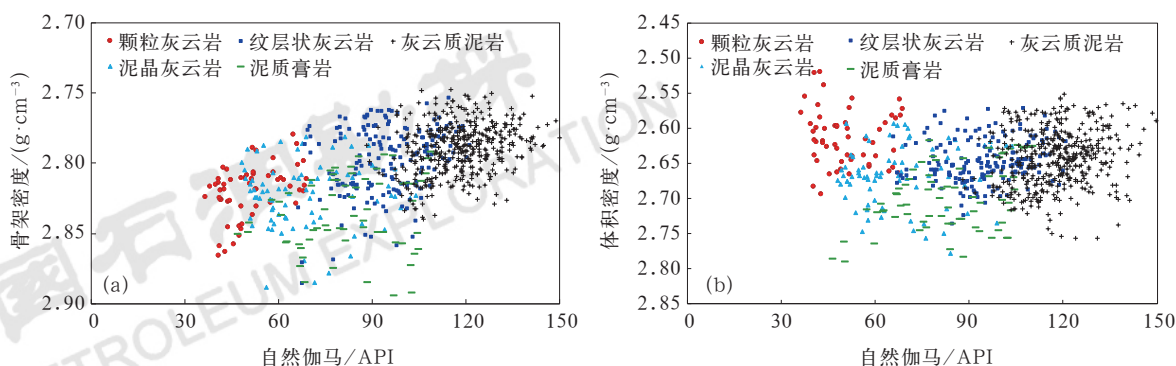


图5 英西地区5种岩相常规测井响应特征

Fig.5 Conventional logging response characteristics of five types of lithofacies in Yingxi area

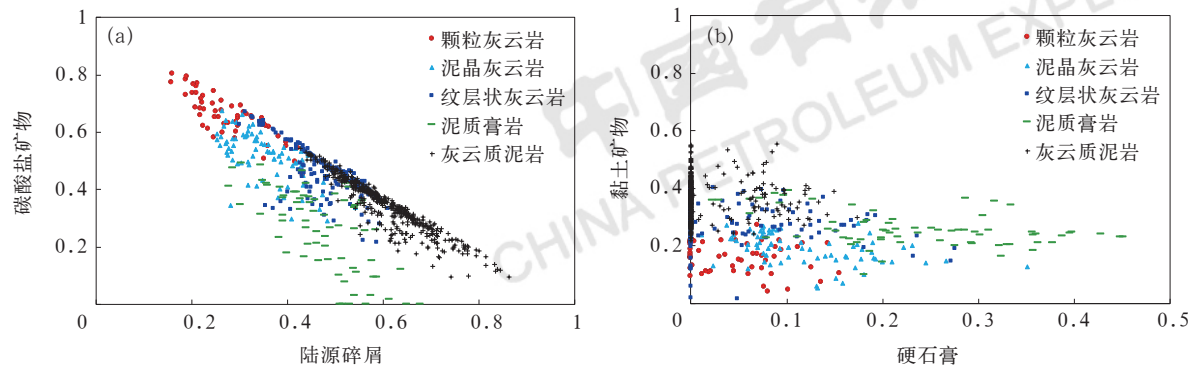


图 6 英西地区 5 种岩相元素测井矿物成分特点

Fig.6 Mineral composition characteristics of five types of lithofacies from element logs in Yingxi area

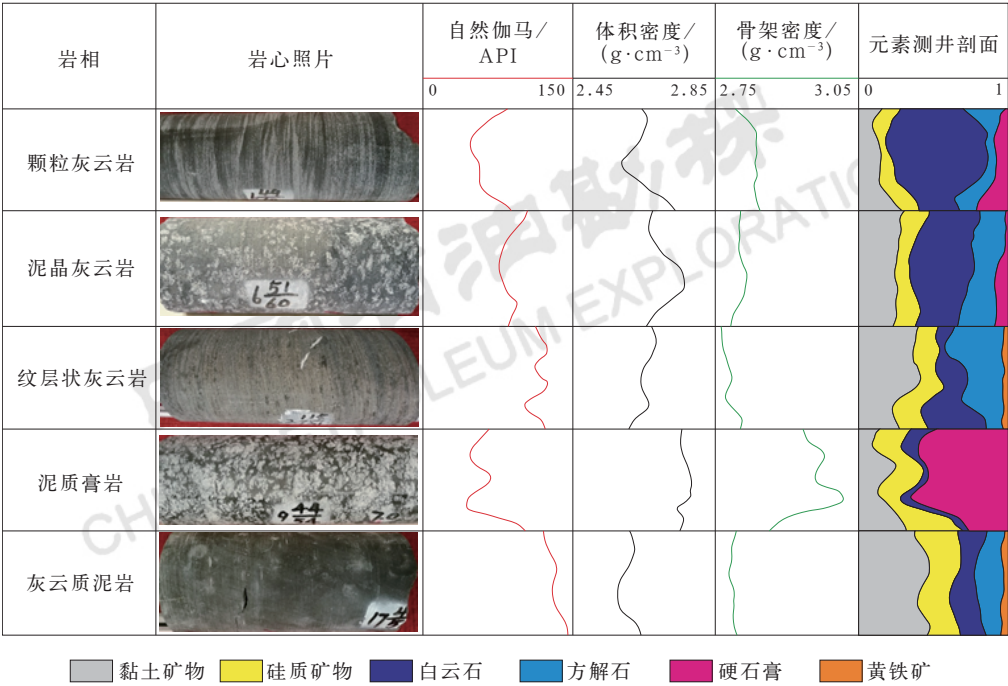


图 7 英西地区 5 种岩相测井响应特征图版

Fig.7 Log response characteristics chart of five types of lithofacies in Yingxi area

4 基于岩石结构的测井岩相识别方法

针对英西地区湖相碳酸盐岩的岩石混积特征和复杂的测井响应特征，将岩相评价的重点由矿物组分及其含量计算转变为岩石结构识别，并建立了岩石结构因子 (Rock Fabric Factor, *RFF*) 技术进行岩相测井识别。

对岩心实验和测井资料分析后发现，研究区湖相碳酸盐岩存在以下 3 个特征。

(1) 岩石黏土矿物含量越高，颗粒越细，放射性越强。

研究区发育的 5 类岩相中，灰云质泥岩的黏土矿物含量最高，颗粒也最细，自然伽马值最高；纹层状灰云岩、泥晶灰云岩和颗粒灰云岩黏土矿物含量均低于灰云质泥岩，且 3 类岩相黏土矿物含量逐渐降低，颗粒粒度逐渐变粗，自然伽马值也逐渐降低；泥质膏岩由于硬石膏的存在，黏土矿物含量和自然伽马值较低，但略高于颗粒灰云岩。自然伽马和黏土矿物含量随着岩相变化具有较好的正相关性（图 8）。

(2) 黏土矿物含量越高，物性越差。

黏土矿物通常以填隙物的形式充填在颗粒间的孔隙中，使得岩石的孔隙度降低，因此黏土矿物含

量越高,岩石孔隙度越小,物性越差。从岩心全岩和物性分析资料发现,研究区湖相碳酸盐岩黏土矿物含量和孔隙度随岩相变化具有较好的负相关性(图9)。

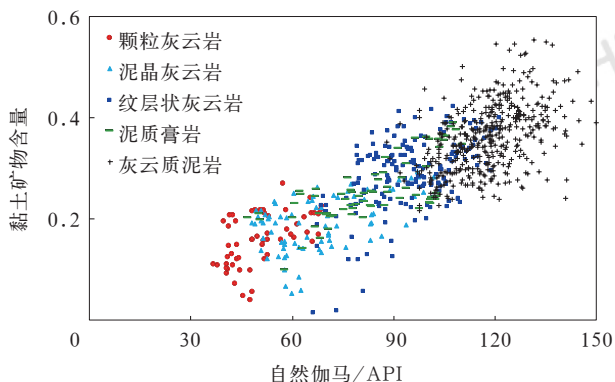


图8 英西地区5种岩相自然伽马—黏土矿物含量交会图
Fig.8 Crossplot of GR-clay mineral content of five types of lithofacies in Yingxi area

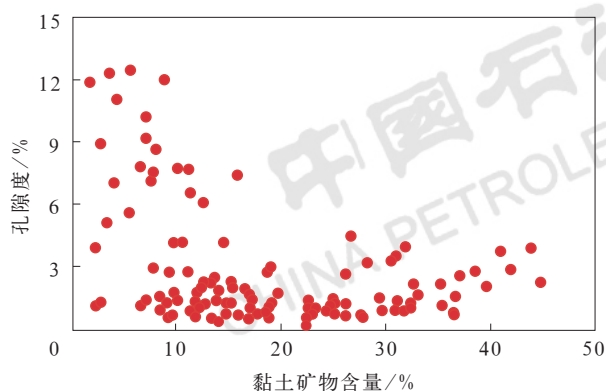


图9 英西地区湖相碳酸盐岩黏土矿物含量—孔隙度交会图
Fig.9 Crossplot of clay mineral content-porosity of lacustrine carbonate rocks in Yingxi area

(3) 岩石颗粒越粗,物性越好。

颗粒灰云岩、泥晶灰云岩和灰云质泥岩颗粒逐渐变细,总孔隙度逐渐降低。从岩心核磁共振资料中可以看出,随着岩石颗粒变粗, T_2 谱能量强、谱峰逐渐右移,指示孔隙半径逐渐变大,孔隙结构变好,孔隙度增加(图10)。

基于以上3点特征,认为黏土矿物含量、孔隙度和粒度3个参数能够反映研究区岩相的变化,且这3个参数可据测井资料求取。自然伽马可以反映泥质含量和粒度的变化,体积密度和骨架密度可以反映孔隙度的变化。因此通过自然伽马、体积密度和骨架密度建

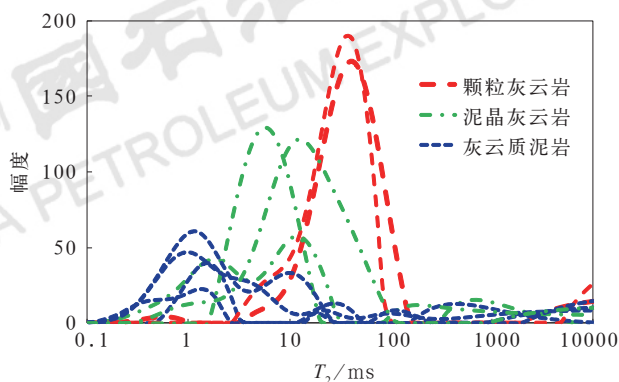


图10 英西地区湖相碳酸盐岩岩心核磁共振 T_2 分布图
Fig.10 NMR T_2 distribution of lacustrine carbonate core samples in Yingxi area

立了岩石结构因子(RFF)公式[公式(1)],来定量识别岩相。地层中通常包含矿物骨架和流体,矿物骨架的平均密度即为骨架密度。元素测井可以获得地层岩石主要矿物的含量,由于每种矿物对应固定的骨架密度,于是根据地层中的矿物类型和含量就可以计算出地层的骨架密度[公式(2)]。

$$RFF = (GR_{\max} - GR) \times \frac{\rho_{\text{ma}} - \rho_b}{\rho_{\text{ma}}} \quad (1)$$

$$\rho_{\text{ma}} = \sum_{i=1}^m \rho_i M_i \quad (2)$$

式中 RFF ——岩石结构因子;

GR_{\max} ——目的段自然伽马最大值, API;

GR ——自然伽马测井值, API;

ρ_{ma} ——骨架密度, g/cm^3 ;

ρ_b ——体积密度测井值, g/cm^3 ;

m ——地层中矿物种类;

M_i ——地层中第 i 种矿物的质量分数;

ρ_i ——第 i 种矿物对应的骨架密度。

结合元素测井资料,分别建立 RFF —自然伽马和碳酸盐矿物—陆源碎屑交会图(图11)。虽然不同岩相对应的数据点在交会图中仍有一定的重叠,例如在 RFF —自然伽马交会图中,纹层状灰云岩和泥质膏岩有一定重叠,在碳酸盐矿物—陆源碎屑交会图中灰云质泥岩和纹层状灰云岩有一定重叠,但将两个图版配合使用即可将5类岩相区分开。在 RFF —自然伽马交会图中,纹层状灰云岩与泥质膏岩所处区间高度重叠,但二者在碳酸盐矿物—陆源碎屑交会图中则区分度较好,故可将纹层状灰云岩与泥质膏岩区分出来。

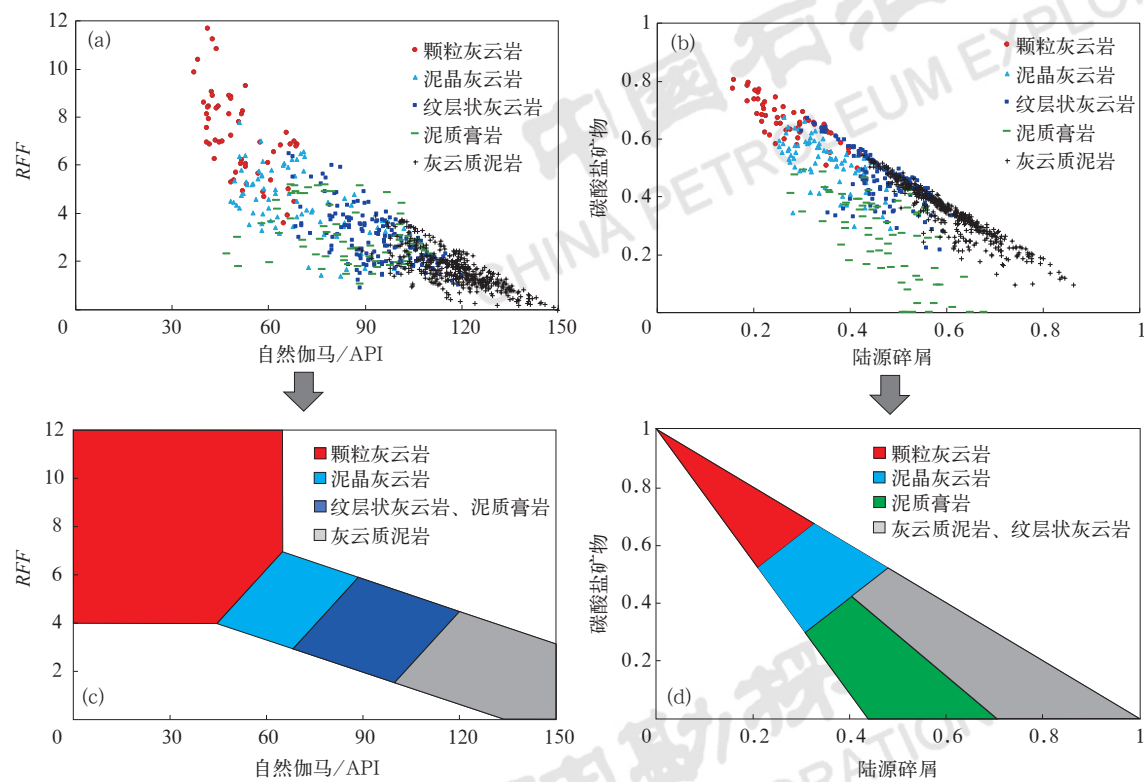


图 11 英西地区岩相交会图及识别图版

Fig.11 Lithofacies crossplot and identification chart in Yingxi area

(a) RFF —自然伽马交会图；(b) 碳酸盐矿物—陆源碎屑交会图；(c) RFF —自然伽马岩相识别图版；(d) 碳酸盐矿物—陆源碎屑岩相识别图版

5 技术应用

图 12 为 S43 井岩相识别成果图。S43 井取心段长 19.8m，发育有颗粒灰云岩、泥晶灰云岩、泥质膏

岩和灰云质泥岩。受限于测井资料的纵向分辨率，基于岩石结构的测井岩相识别方法除对厚度小于 0.2m 的薄层分辨能力较差外，对非薄层岩相识别效果较好，S43 井解释符合率为 87%。将岩石结构因子技术应用于研究区 48 口井，在 12 口取心井中岩相解释平均符合率达到 80.2%，应用效果较好。

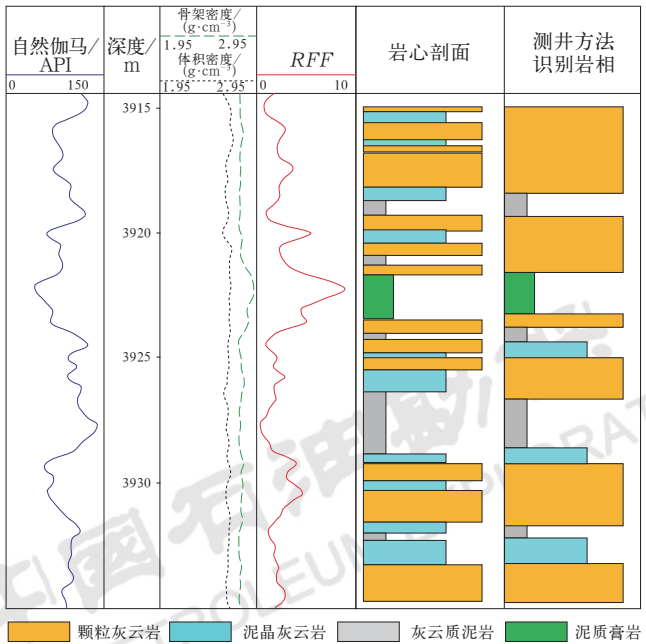


图 12 S43 井岩相识别成果图

Fig.12 Lithofacies identification plot of Well S43

6 结论

英西地区 E_3^2 湖相碳酸盐岩储层广泛发育，是目前勘探开发的一个重点区块，本文通过研究得出如下结论与认识：

(1) 英西地区受沉积环境影响，根据岩心和实验分析资料，可将研究区岩相划分为 5 种类型，分类结果显示岩石结构和矿物组分是影响该区测井响应的关键因素。

(2) 基于测井响应特征分析，通过自然伽马、体积密度和骨架密度等 3 种测井参数构建 RFF ，并结合元素测井资料可有效识别 5 类岩相。

(3) 本文采用的岩相分类方案和识别方法具有明确的地质意义，有效建立起地质特征与测井参数之间的“桥梁”，克服了常规岩相分类方案和测井岩相识

别方法间测井参数关联度低的不足,可推广应用于其他复杂湖相碳酸盐岩岩相识别。

参考文献

- [1] 杨智,侯连华,陶士振,等.致密油与页岩油形成条件与“甜点区”评价[J].石油勘探与开发,2015,42(5):555-565.
Yang Zhi, Hou Lianhua, Tao Shizhen, *et al.* Formation conditions and “sweet spot” evaluation of tight oil and shale oil[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015,42(5): 555-565.
- [2] 赵贤正,周立宏,蒲秀刚,等.陆相湖盆页岩层系基本地质特征与页岩油勘探突破:以渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔店组二段一亚段为例[J].石油勘探与开发,2018,45(3):361-372.
Zhao Xianzheng, Zhou Lihong, Pu Xiugang, *et al.* Geological characteristics of shale rock system and shale oil exploration in a lacustrine basin: a case study from the Paleogene 1st sub-member of Kong 2 member in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(3):361-372.
- [3] 赵文智,沈安江,乔占峰,等.中国碳酸盐岩沉积储层理论进展与海相大油气田发现[J].中国石油勘探,2022,27(4):1-15.
Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Qiao Zhanfeng, *et al.* Theoretical progress in carbonate reservoir and discovery of large marine oil and gas fields in China[J]. China Petroleum Exploration, 2022,27(4):1-15.
- [4] 沈安江,胡安平,梁峰,等.碳酸盐岩储层模拟与地球化学实验技术进展及应用[J].中国石油勘探,2022,27(4):16-29.
Shen Anjiang, Hu Anping, Liang Feng, *et al.* Progress and application of carbonate reservoir simulation and geochemical experiment technology[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(4):16-29.
- [5] 侯启军,何海清,李建忠,等.中国石油天然气股份有限公司近期油气勘探进展及前景展望[J].中国石油勘探,2018,23(1):1-13.
Hou Qijun, He Haiqing, Li Jianzhong, *et al.* Recent progress and prospect of oil and gas exploration by PetroChina Company Limited[J]. China Petroleum Exploration, 2018,23(1):1-13.
- [6] 张道伟,马达德,伍坤宇,等.柴达木盆地致密油“甜点区(段)”评价与关键技术应用:以英西地区下干柴沟组上段为例[J].天然气地球科学,2019,30(8):1134-1149.
Zhang Daowei, Ma Dade, Wu Kunyu, *et al.* Evaluation and key technology application of tight oil areas/sections in Qaidam Basin: case of the upper member of the Lower Ganchaigou Formation in Yingxi area[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(8):1134-1149.
- [7] 卢炳雄,郑荣才,梁西文,等.四川盆地东部地区大安寨段页岩气(油)储层特征[J].中国地质,2014,41(4):1387-1398.
Lu Bingxiong, Zheng Rongcai, Liang Xiwen, *et al.* Characteristics analysis of Da'anzhai shale gas(oil) reservoirs in eastern Sichuan Basin[J]. Geology in China, 2014,41(4):1387-1398.
- [8] 彭传圣.湖相碳酸盐岩有利储集层分布:以渤海湾盆地沾化凹陷沙四上亚段为例[J].石油勘探与开发,2011,38(4):435-443.
Peng Chuansheng. Distribution of favorable lacustrine carbonate reservoirs: a case from the Upper Es₄ of Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011,38(4):435-443.
- [9] 付金华,刘新社,魏柳斌,等.鄂尔多斯盆地奥陶系盐下马家沟组四段天然气勘探突破及意义[J].中国石油勘探,2022,27(2):47-58.
Fu Jinhua, Liu Xinshe, Wei Liubin, *et al.* Breakthrough and significance of natural gas exploration in the fourth member of Majiagou Formation of subsalt Ordovician in Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2022,27(2):47-58.
- [10] 何海清,范士芝,郭绪杰,等.中国石油“十三五”油气勘探重大成果与“十四五”发展战略[J].中国石油勘探,2021,26(1):17-30.
He Haiqing, Fan Tuzhi, Guo Xujie, *et al.* PetroChina: Major achievements in oil and gas exploration during the 13th Five-Year Plan period and development strategy for the 14th Five-Year Plan period[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(1):17-30.
- [11] 赵文智,贾爱林,王坤,等.中国天然气“十三五”勘探开发理论技术进展与前景展望[J].石油科技论坛,2021,40(3):11-23.
Zhao Wenzhi, Jia Ailin, Wang Kun, *et al.* Theoretical and technological progress and development prospect of China's natural gas exploration and development in the 13th Five-Year Plan period[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2021, 40(3):11-23.
- [12] 柳波,吕延防,孟元林,等.湖相纹层状细粒岩特征、成因模式及其页岩油意义:以三塘湖盆地马朗凹陷二叠系芦苇沟组为例[J].石油勘探与开发,2015,42(5):598-607.
Liu Bo, Lv Yanfang, Meng Yuanlin, *et al.* Petrologic characteristics and genetic model of lacustrine lamellar fine-grained rock and its significance for shale oil exploration: a case study of Permian Lucaogou Formation in Malang Sag, Santanghu Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015,42(5):598-607.
- [13] 蒯克来,操应长,朱如凯,等.吉木萨尔凹陷二叠系芦苇沟组致密油储层岩石类型及特征[J].石油学报,2015,36(12):1495-1507.
Xi Kelai, Cao Yingchang, Zhu Rukai, *et al.* Rock types and characteristics of tight oil reservoir in Permian Lucaogou Formation, Jimsar Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015,36(12): 1495-1507.
- [14] 文华国,郑荣才, Qing H R, 等.青藏高原北缘酒泉盆地青西凹陷白垩系湖相热水沉积原生白云岩[J].中国科学:地球科学,2014,44(4): 591-604.
Wen Huaguo, Zheng Rongcai, Qing H R, *et al.* Primary dolostone related to the Cretaceous lacustrine hydrothermal sedimentation in Qingxi Sag, Jiuquan Basin on the northern Tibetan Plateau[J]. Science China: Earth Science, 2014,44(4): 591-604.
- [15] 杨生超,邱隆伟,刘魁元,等.邵家洼陷沙四段湖相碳酸盐岩岩性测

- 井解释模型[J]. 新疆石油地质, 2015,36(6):708-713.
- Yang Shengchao, Qiu Longwei, Liu Kuiyuan, *et al.* Lithology logging interpretation model for lacustrine carbonate rocks of the Es₄ in Shaojia Sub Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015,36(6):708-713.
- [16] 吴煜宇, 张为民, 田昌炳, 等. 成像测井资料在礁滩型碳酸盐岩储集层岩性和沉积相识别中的应用: 以伊拉克鲁迈拉油田为例[J]. 地球物理学进展, 2013,28(3):1497-1506.
- Wu Yuyu, Zhang Weimin, Tian Changbing, *et al.* Application of image logging in identifying lithologies and sedimental facies in reef-shoal carbonate reservoir: take Rumaila Oil Field in Iraq for example[J]. Progress in Geophysics, 2013,28(3):1497-1506.
- [17] 成大伟, 袁选俊, 周川闽, 等. 测井岩性识别方法及应用: 以鄂尔多斯盆地中西部长7油层组为例[J]. 中国石油勘探, 2016,21(5):117-126.
- Cheng Dawei, Yuan Xuanjun, Zhou Chuanmin, *et al.* Logging-lithology identification methods and their application: a case study on Chang 7 member in central-western Ordos Basin, NW China[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(5):117-126.
- [18] 李昌, 乔占峰, 邓兴梁, 等. 视岩石结构数技术在测井识别碳酸盐岩岩相中的应用[J]. 油气地球物理, 2017,15(1):29-35.
- Li Chang, Qiao Zhanfeng, Deng Xingliang, *et al.* Application of the apparent rock fabric number calculation technique in logging identification of the carbonate rock type[J]. Petroleum Geophysics, 2017,15(1):29-35.
- [19] 张治国, 杨毅恒, 夏立显. 自组织特征映射神经网络在测井岩性识别中的应用[J]. 地球物理学进展, 2005,20(2):332-336.
- Zhang Zhiguo, Yang Yiheng, Xia Lixian. The application of self-organizing feature map neural network to logging lithological identification[J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(2):332-336.
- [20] 田瀚, 辛勇光, 张豪, 等. 基于常规测井资料的复杂岩性识别: 以龙岗地区雷四₃亚段为例[J]. 天然气勘探与开发, 2019,42(4):55-65.
- Tian Han, Xin Yongguang, Zhang Hao, *et al.* Complex lithology identification based on conventional well logging: a case of the T₂L₄³ in Longgang area[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2019,42(4):55-65.
- [21] 刘爱疆, 左烈, 李景景, 等. 主成分分析法在碳酸盐岩岩性识别中的应用: 以YH地区寒武系碳酸盐岩储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2013,34(2):192-196.
- Liu Aijiang, Zuo Lie, Li Jingjing, *et al.* Application of principal component analysis in carbonate lithology identification: a case study of the Cambrian carbonate reservoir in YH field[J]. Oil & Gas Geology, 2013,34(2):192-196.
- [22] 汤小燕, 刘之的, 邹正银, 等. 准噶尔盆地六九区火成岩岩性识别方法研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2009,31(1):29-32, 184.
- Tang Xiaoyan, Liu Zhidi, Zou Zhengyin, *et al.* The identification method of igneous rock lithology in 69 area of Junggar Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2009,31(1):29-32,184.
- [23] 吴施楷, 曹俊兴. 基于连续限制玻尔兹曼机的支持向量机岩性识别方法[J]. 地球物理学进展, 2016,31(2):821-828.
- Wu Shikai, Cao Junxing. Lithology identification method based on continuous restricted Boltzmann machine and support vector machine[J]. Progress in Geophysics, 2016,31(2):821-828.
- [24] 袁照威, 段正军, 张春雨, 等. 基于马尔科夫概率模型的碳酸盐岩储集层测井岩性解释[J]. 新疆石油地质, 2017,38(1):96-102.
- Yuan Zhaowei, Duan Zhengjun, Zhang Chunyu, *et al.* Interpretation of logging lithology in carbonate reservoirs based on Markov chain probability model[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2017,38(1):96-102.
- [25] 刘占国, 朱超, 李森明, 等. 柴达木盆地西部地区致密油地质特征及勘探领域[J]. 石油勘探与开发, 2017,44(2):196-204.
- Liu Zhanguo, Zhu Chao, Li Senming, *et al.* Geological features and exploration fields of tight oil in the Cenozoic of western Qaidam Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017,44(2):196-204.
- [26] 夏志远, 刘占国, 李森明, 等. 岩盐成因与发育模式: 以柴达木盆地英西地区古近系下干柴沟组为例[J]. 石油学报, 2017,38(1):55-66.
- Xia Zhiyuan, Liu Zhanguo, Li Senming, *et al.* Origin and developing model of rock salt: a case study of Lower Ganchaigou Formation of Paleogene in the west of Yingxiong ridge, Qaidam Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017,38(1):55-66.