

油页岩岩性非均质性特征及地球物理精细刻画 ——以苏北盆地溱潼凹陷阜宁组二段为例

王超^{1,2,3}, 陆永潮², 杜学斌², 刘占红²

[1. 中国石化 江汉石油管理局, 湖北 潜江 433124; 2. 中国地质大学(武汉) 资源学院, 湖北 武汉 430074

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

摘要:为了阐明苏北盆地溱潼凹陷阜宁组二段油页岩岩性非均质性特征及时空展布规律,应用岩心、测井、地化测试和三维地震资料,从岩石类型、测井曲线、总有机碳含量和矿物组分4个方面将油页岩岩性划分为黑色泥岩、粉砂质泥岩和灰质泥岩3类。在此基础上以层序划分为标准,利用岩相流体概率分析技术开展油页岩岩性时空预测研究,并结合实际录井资料验证了预测结果的准确性和可靠性。预测结果揭示出早期湖扩体系域时期,灰质泥岩在工区内广泛发育,粉砂质泥岩仅局限于凹陷西南部,随湖平面上升,灰质泥岩局限于凹陷中部,粉砂质泥岩集中发育于凹陷西南和东北两处,并可见黑色泥岩连片发育;晚期湖扩体系域时期,凹陷内以黑色泥岩发育为主,灰质泥岩呈零星分布,粉砂质泥岩集中发育于工区西南部和北部。以上技术方法和实践应用表明,岩相流体概率分析技术能够准确预测油页岩岩性非均质性时空展布特征,对油页岩勘探开发具有重要意义。

关键词:非均质性;岩相流体概率;油页岩;阜宁组;溱潼凹陷

中图分类号:TE311

文献标识码:A

Characteristics and geophysical prediction of lithology heterogeneity of oil shale: Taking the 2nd Member of Funing Formation of Qintong sag, Subei Basin, as an example

Wang Chao^{1,2,3}, Lu Yongchao², Du Xuebin², Liu Zhanhong²

[1. Jiangnan Petroleum Administration Bureau, Qianjiang, Hubei 433124, China; 2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; 3. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China]

Abstract: In order to illustrate the lithologic heterogeneity characteristics and spatial-temporal distribution of oil shale of the 2nd Member of Funing Formation in Qintong sag, Subei Basin, this paper makes research on lithology heterogeneity of shale through cores, well logging, geochemical tests and 3D seismic data. After analyzing rock type, well logs, TOC and mineral contents, the oil shale is divided into black shale, silty mudstone and lime mudstone. After the research on lithology division and isochronous sequence stratigraphic framework, Facies and Fluids Probabilities (FFP) method is used to predict the spatial-temporal distribution of various lithologies within the oil shale, and the prediction results are confirmed by the real logging data. The results indicate that in the early expansion system tract, lime mudstone widely developed in the research area, meanwhile silty mudstone only developed in the southwest of Qintong sag. With the lake level rising, lime mudstone developed in the central sag and silty mudstone developed in the southwest and northeast of the sag. Black shale deposited in the entire area. In the late expansion system tract, black shale was widely deposited in the sag, while lime mudstone developed sporadically and silty mudstone only developed in the southwest and northeast of the sag. In conclusion, FFP can accurately predict the temporal and spatial distribution of various lithologies within oil shale, which has important significance for the exploration and development of oil shale.

Key words: heterogeneity, facies and fluids probabilities (FFP), oil shale, Funing Formation, Qintong sag

国际上页岩油勘探开发的成功实例使非常规油气资源备受各国关注^[1-3],并成为未来重要的资源勘探

收稿日期:2014-12-20;修订日期:2015-07-20。

第一作者简介:王超(1986—),男,博士研究生,层序地层学及地震沉积学。E-mail: wangchao0502@163.com。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2014CB239102);国家自然科学基金项目(41202087);中国博士后科学基金项目(201003654)。

开发领域之一^[4-5]。油页岩是一种高灰分的固体可燃有机矿产,其中的液态烃类未进行运移,低温干馏可获得类似天然石油的页岩油,属于非常规油气资源^[6-7]。全球油页岩资源量巨大,折算成页岩油可达 4000×10^9 t,相当于目前世界天然原油探明可采储量的 5.4 倍^[8-11],其中美国的巴肯页岩是最为成功的油页岩勘探实例。我国油页岩资源丰富,截止 2011 年底,查明资源储量达 $1\,183 \times 10^9$ t^[12]。近年来,国内外学者对富生烃拗陷油页岩结构、非均质性、沉积微相特征及其控制因素等方面开展了大量研究,并在油页岩多种非均质性及油气吸附-富集规律等方面取得了重大突破。研究揭示在层序格架下,海平面升降变化控制了油页岩结构、岩性组合和沉积微相垂向上的非均质性变化,进而影响了总有机碳含量、含气量等的垂向分布,因此油页岩层系内部的岩性非均质性研究对页岩油在垂向上的富集和赋存规律具有重要意义^[13-15]。本文以苏北盆地溱潼凹陷阜宁组二段油页岩为研究对象,针对单井资料少及常规地球物理技术的局限性等问题,尝试性地采用基于叠后反演的岩相流体概率分析技术开展油页岩岩性非均质性研究,刻画不同岩性的时空展布特征,以期对溱潼凹陷阜宁组二段的页岩油的勘探开发提供参考。

1 研究区概况

溱潼凹陷位于苏北盆地东台坳陷中部,是一个在

新生代拉张背景下形成的箕状凹陷,呈南断北超、南陡北缓的特征^[16]。构造上属于苏北-南黄海盆地东台坳陷的一个次级构造单元(三级构造单元)。该凹陷位于东台坳陷区吴堡低凸起与泰州凸起之间,北以吴堡-博镇断裂为界,东南部与泰州凸起以断层相接,整体呈北东东向展布,其东北方向开阔,西南部狭窄,平面为西窄东宽特征^[17](图 1)。溱潼凹陷构造演化大致经历了拗陷、断陷和拗陷演化阶段,受同生断裂带控制^[18-19]。

溱潼凹陷主要页岩油勘探目的层段自下而上依次为泰州组二段、阜宁组二段和四段。本次研究的目的层段为阜二段,是一套暗色泥岩为主的湖相沉积岩系,厚度一般为 50~350 m,岩性组合为灰黑色泥岩夹薄层灰质泥岩、油页岩夹鲕状灰岩。与下伏阜一段呈整合接触,局部为假整合接触。

2 阜二段油页岩岩性非均质性特征

2.1 岩石类型

阜宁组二段(阜二段)油页岩岩性具有典型的非均质性特征。142 口单井统计资料显示,阜二段平均地层厚度 131.87 m,其中黑色泥岩平均厚度 127.12 m,占平均地层厚度的 96.40%,主要分布于深凹带,可见水平层理发育。底部灰质泥岩为滨浅湖沉积,最大厚度可达 20 m。粉砂质泥岩在阜二段底部及顶部均可见,厚度较薄(2~3 m),颗粒分选性好,磨圆程度高,并见泥刺穿。综合而言,阜二段主要由黑色泥岩、粉砂质泥岩及灰质

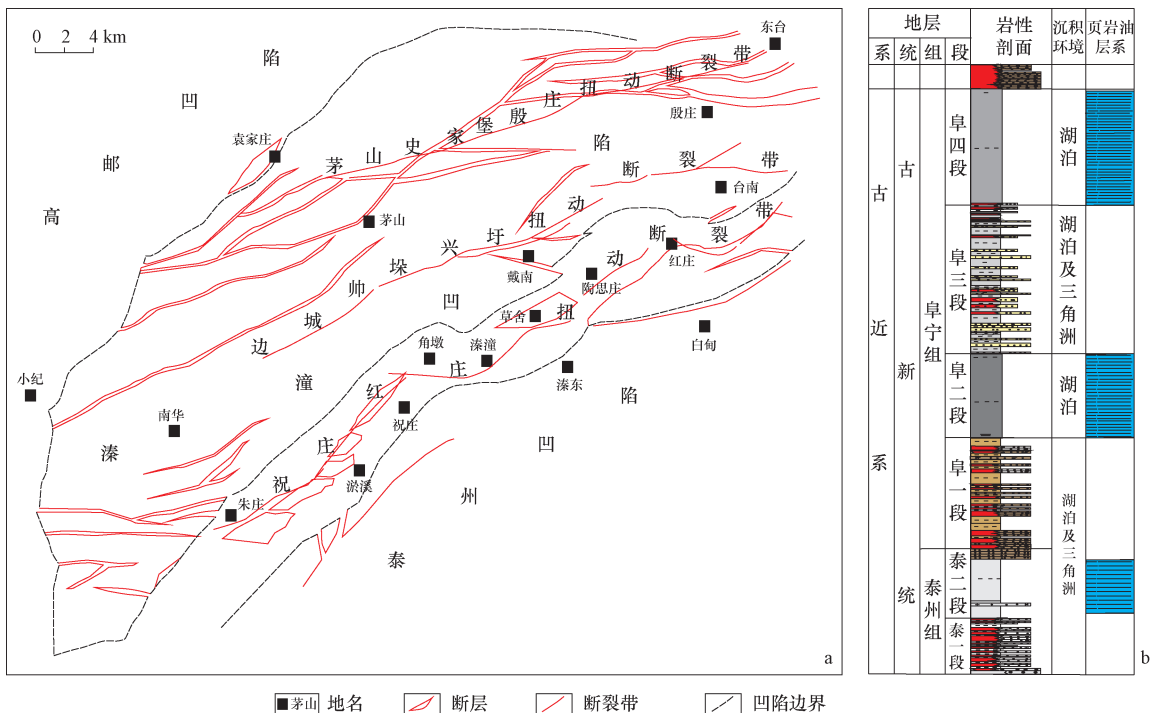


图 1 苏北盆地溱潼凹陷构造划分单元(a)及充填序列(b)
Fig. 1 Structure division(a) and sedimentary sequence(b) of Zintong sag in Subei Basin

泥岩三类岩性组成,并以黑色泥岩为主,中下部夹薄层灰质泥岩,顶部可见薄层粉砂质泥岩。

2.2 测井曲线特征

油页岩层系内不同岩性矿物组分和骨架结构的差异性决定了不同岩性其测井曲线具有显著差异性^[20],具体特征如下:①自然伽马曲线在黑色泥岩段数值较高,变化幅度小,呈低幅高值箱形特征,在粉砂质泥岩段表现为高幅低值漏斗状特征,这主要由于有机质富含铀、钾、钍等放射性元素,使得富含有机质黑色泥岩其自然伽马值较高^[21-22];②密度曲线在厚层灰质泥岩段表现为高值低幅箱形特征,在黑色泥岩和薄层粉砂质泥岩段表现为中低值高幅漏斗状特征,这是由于有机质密度较小,当其取代岩石骨架时,岩石密度减小,因此泥岩和粉砂质泥岩其密度测井值较低(图2)。

2.3 总有机碳含量

由于受沉积环境影响,地层中总有机碳含量分布也具有非均一性特征。基于地化测试数据,对俞5井总有机碳含量(TOC)垂向分布规律分析可知,TOC具有自下向上数值变小的趋势。结合岩性对比发现,灰质泥岩的TOC值最大,其次为黑色泥岩,粉砂质泥岩TOC数值最小,反映出灰质泥岩中有机质赋存情况较好。然而,灰质泥岩自身也具有非均质性。其中底部厚层灰质泥岩TOC含量最大,上部灰质泥岩夹粉砂质泥岩段TOC含量略有减少(图2)。

2.4 矿物组分

油页岩岩石矿物组分在垂向上也显示出非均质性特征^[23]。脆性矿物方面,石英、钾长石、斜长石及白云石变化规律一致,表现出粉砂质泥岩为高值,灰质泥岩及黑色泥岩为低值。而方解石含量则表现出黑色泥岩为高值,粉砂质泥岩及灰质泥岩分别为中、低值特征。粘土矿物方面,灰质泥岩及粉砂质泥岩中绿泥石、伊利石和伊蒙混层含量较高,未见高岭石及蒙脱石;而黑色泥岩中高岭石和蒙脱石含量相对较高,伊利石含量较低(图2)。

3 油页岩岩性地球物理精细刻画

单井岩心、测井曲线、TOC含量及矿物组分综合分析可知,阜二段油页岩岩性具有显著的非均质性特征,可划分为灰质泥岩、粉砂质泥岩和泥岩三类岩性组合。现阶段针对油页岩层系内部岩性预测的地球物理手段较为有限,传统地震属性及反演手段难以开展定量的高精度岩性识别^[24-25],在此选用岩相流体概率分析技术对油页岩层系内不同岩性进行地球物理精细刻画。

3.1 理论原理

岩相流体概率分析(FPP)主要应用于叠后或叠前反演所得到的弹性属性,在对不同岩性/含流体类型条件下其测井弹性属性的分布特征进行综合研究基础上^[26],定义各类岩性其弹性属性的概率密度函数(PDFs),对反演结果的每一样本点进行岩相或流体的概率分析,然后应用贝叶斯模糊判别分析(Bayesian Inference)技术,计算各种岩性类型的空间分布概率。岩相流体概率分析技术可形成各类岩性的概率体,同时可生成极大似然岩相体。相较于传统反演技术,岩相流体概率分析利用测井弹性属性可将波阻抗数据体转化为岩相概率体,后者具有更加明确的地质意义,从而实现对油页岩层系内不同岩性更为直观的时空展布预测。

3.2 工作流程

基于确定性反演结果的岩相流体概率分析在开展油页岩层系岩性预测过程中,主要包括岩性-测井识别、可行性分析、概率密度函数分析及结果输出4个步骤。

首先岩性-测井识别方面,通过对俞5井和莫深2井两口井岩性-测井分析可知,阜二段油页岩岩性非均质性特征在测井曲线上具有典型响应。泥岩段测井曲线具有高GR、低DEN特征,灰质泥岩段具有高GR、高DEN特征,粉砂质泥岩段具有低GR、中DEN特征。不同岩性其测井曲线的差异性特征是开展岩相模拟的基础资料。然后利用测井曲线拟合,开展可行性分析。岩相流体概率分析其应用前提是不同的岩性的弹性参数(P-impedance)是否具有独立性。从各岩性波阻抗交汇图(图3)可知,泥岩具有低波阻抗特征[波峰范围 $(1.8 \sim 2.2) \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],而灰质泥岩具有高波阻抗特征[波峰范围 $(2.8 \sim 3.4) \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],粉砂质泥岩介于两者之间呈中波阻抗特征。三类岩相其波阻抗均呈正态分布特征,主峰没有重叠,干扰性小,是开展油页岩岩性高精度预测的有利前提条件。最后对单井岩性数据进行概率密度函数分析,确定其先验数据范围和后验数据范围,并输出最终数据体。

4 预测结果地质验证

地球物理技术在进行地质预测过程中,预测结果经常会存在多解性问题^[27]。因此结合实际地质资料(岩心、薄片、测井)对预测结果进行地质校验具有重要意义。若地球物理预测结果符合已有的地质认识,并同实际地质资料相吻合,则说明地球物理预测技术的可行性及预测结果的可靠性。

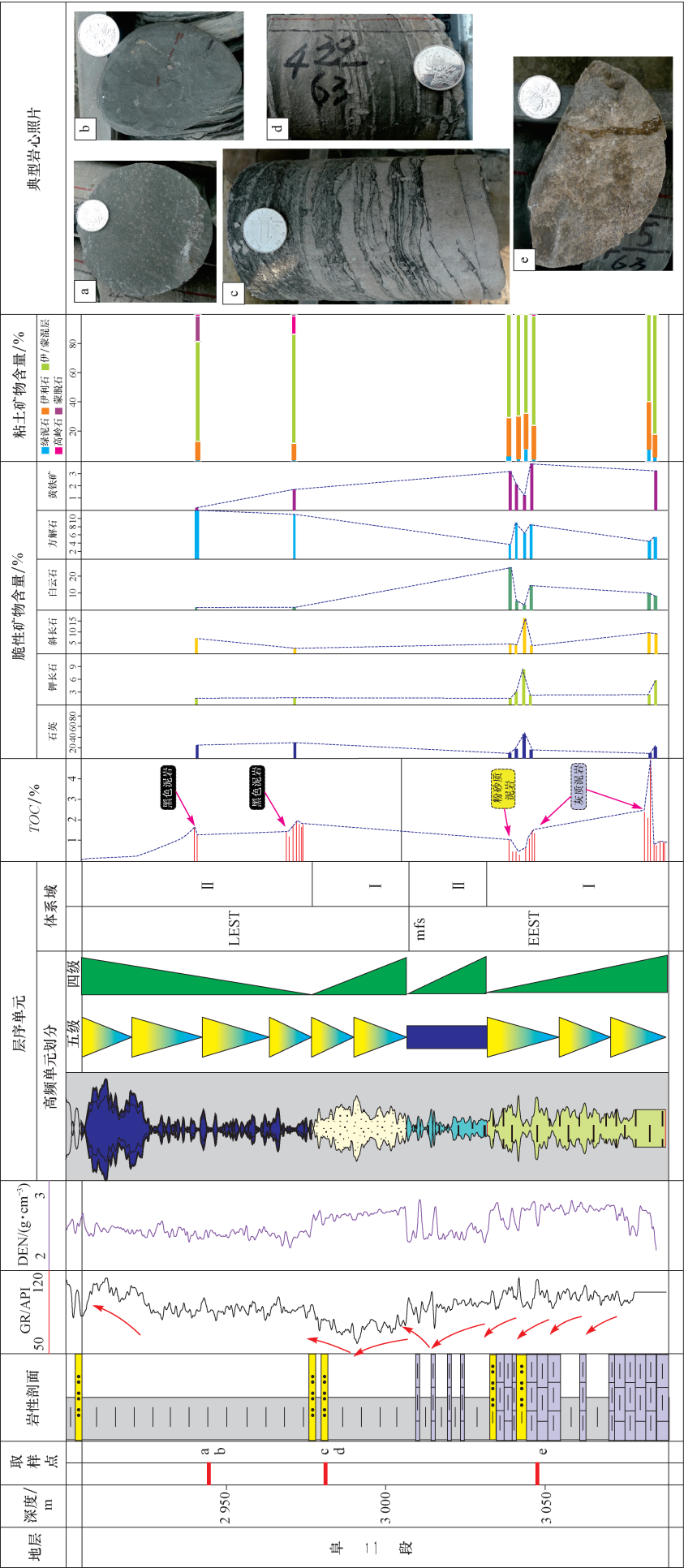


图2 漆潼凹陷阜二段层序划分综合柱状图
Fig.2 Sequence division of the 2nd Member of Funing Formation in Qintong sag
a, b.黑色泥岩; c, d.粉砂质泥岩夹泥质条带; e.灰质泥岩
LEST.晚期湖扩体系域; mfs.最大湖泛面; EEST.早期湖扩体系域

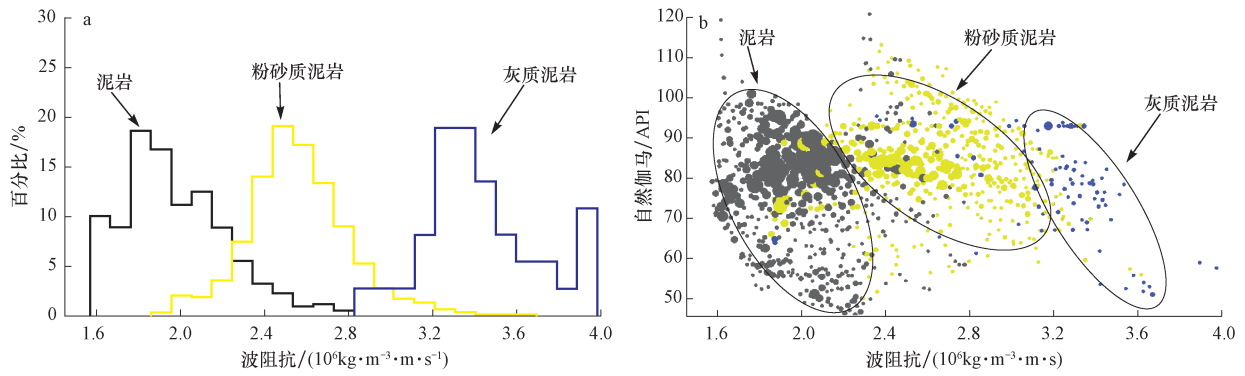


图 3 溱潼凹陷阜二段各岩性波阻抗交汇图

Fig. 3 Crossplot of wave impedance of the 2nd Member of Funing Formation in Qintong sag

a. 岩性 - 波阻抗交汇图; b. 波阻抗 - 自然伽马交汇图

4.1 单井地质验证

以俞 5 井为标准井,通过井震标定,以岩性发育稳定层段为属性时窗,采用地层切片技术提取地震属性,并结合单井岩心资料,验证岩性预测的准确性。从单井地质校验图中可知(图 4),目的层段底部发育厚层灰质泥岩,滴酸起泡,在岩性预测平面图中呈蓝色,表现为灰质泥岩。粉砂质泥岩薄层段在岩心中可见泥刺穿,包卷层理,与之对应的属性图表现为黄色粉砂质泥岩。顶部厚层泥岩段,在属性图中表现黑色泥岩沉积。通过岩心观察同预测结果对比可知,岩相流体概率分析预测岩性的结果是可靠的。

4.2 地震剖面验证

莫深 2 井位于溱潼凹陷东南侧断坡带,受地貌及物源供给影响,莫深 2 井岩性表现同俞 5 井并不完全一致。岩性表现为底部粉砂质泥岩段,向上为厚层泥岩夹块状灰质泥岩段,上部为厚层纯泥岩段,阜二段顶部及阜三段底部出现有 2~4 m 的薄层粉砂质泥岩,显示陆源碎屑供给增强。此次岩性模拟过程中莫深 2 井做为验证并未参与数值运算,从过莫深 2 井岩性剖面可知(图 5),底部粉砂质泥岩、中部块状灰质泥岩及顶部粉砂质泥岩在岩性剖面上均有响应,岩性预测剖面同实际岩性具有较高吻合度。

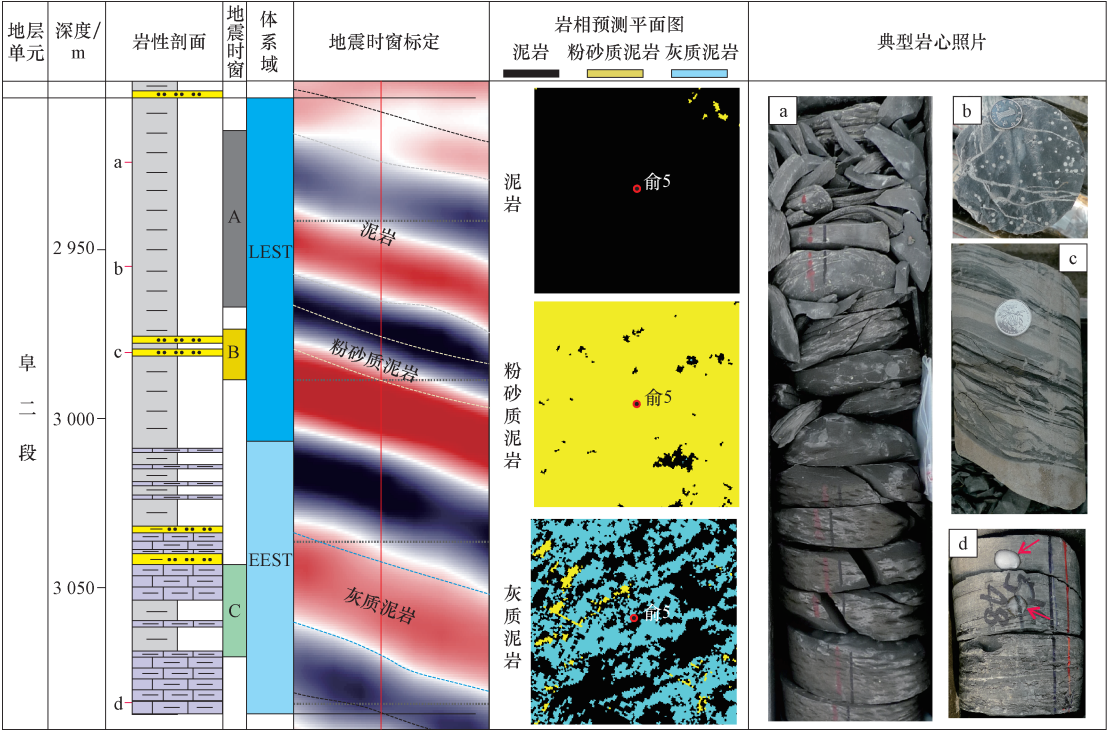


图 4 溱潼凹陷阜二段岩相流体概率分析单井地质校验综合柱状图

Fig. 4 Comprehensive column of single well geological verification of Facies and Fluids Probabilities (FFP)

for the 2nd Member of Funing Formation in Qintong sag

a, b. 黑色泥岩; c. 粉砂质泥岩(泥刺穿); d. 灰质泥岩(滴酸起泡)

LEST. 晚期湖扩体系域; EEST. 早期湖扩体系域

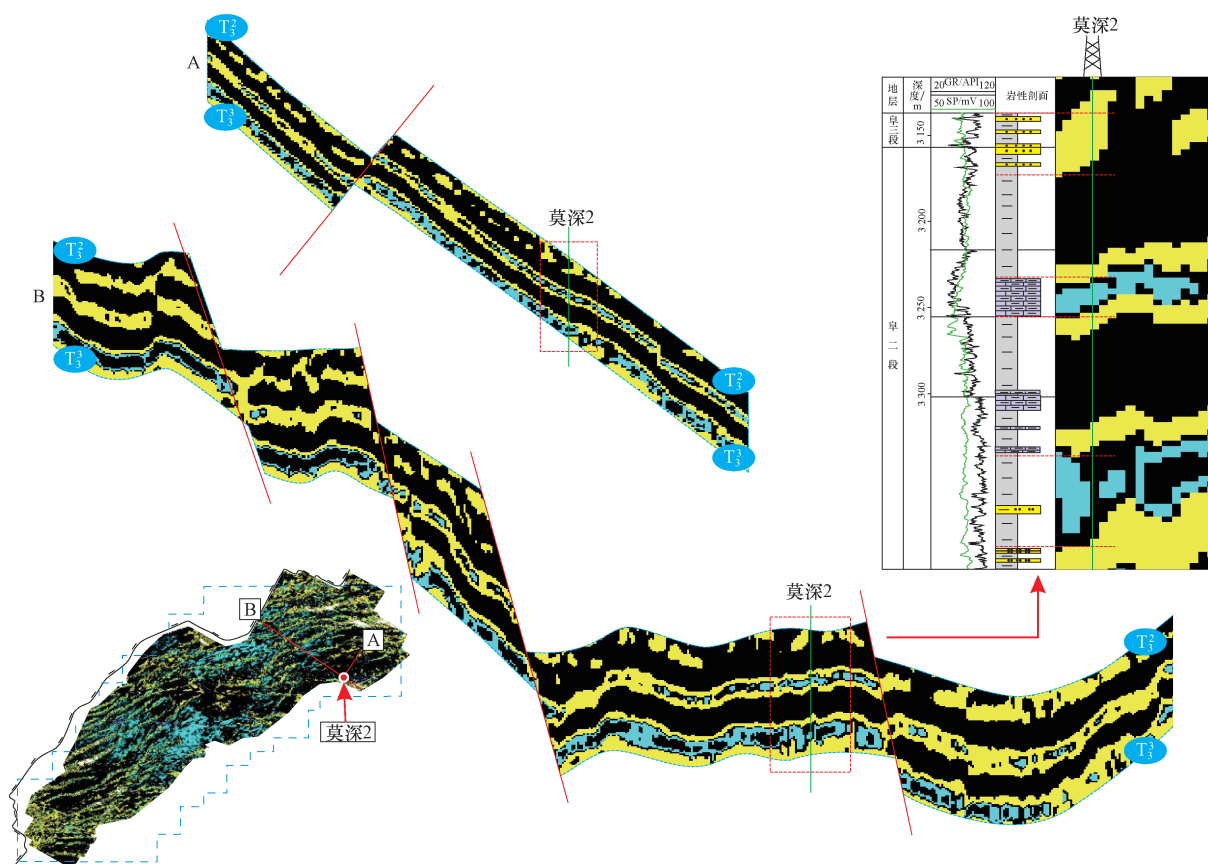


图5 漆潼凹陷阜二段岩相流体概率分析地震剖面校验图

Fig. 5 Seismic profile verification of Facies and Fluids Probabilities (FFP) for the 2nd Member of Funing Formation in Qintong sag

4.3 地质背景分析

阜二段底部全区发育一套厚层灰质泥岩,厚度达90 m,随湖平面上升,过渡为厚层泥岩夹薄层灰质泥岩,灰质泥岩主要发育于凹陷中央次凹带。达到最大湖泛面时,沉积环境稳定,厚层泥岩在全区广泛发育。晚期湖扩体系域时期,随陆源物质供给能力增强,单井和岩性剖面顶部出现粉砂质泥岩段,该岩性段主要发育于凹陷东西两侧靠近物源区域,凹陷内的中央次凹带内鲜有发育。从上述分析可知,岩性预测结果亦同研究区地质背景和沉积环境相吻合(图6)。

5 阜二段油页岩岩性时空展布特征

准确识别油页岩中不同岩性的时空展布特征对页岩油勘探开发至关重要。为有效识别和预测厚层油页岩层系中各岩性横向展布和垂向演化特征,以阜二段层序地层格架划分为基础,对阜二段油页岩岩性时空展布特征进行精细解剖(图6)。

早期湖扩体系域早期(EEST-1),湖平面开始上升,水体加深,沉积环境为浅湖亚相,单井岩心表现为阜二段底部厚层灰质泥岩沉积。灰质泥岩在工区内广泛发育,主要分布于半深湖区和深湖区,粉砂质泥岩主要局限于漆潼凹陷东南部和北部滨湖区及东南部半深

湖区。而黑色泥岩主要分布于西北侧滨湖区,未连片发育。随湖平面持续上升,早期湖扩体系域晚期(EEST-2)水体加深,出现泥岩沉积,并伴有薄层粉砂质泥岩和灰质泥岩互层。预测结果揭示,相较于EEST-1,该时期灰质泥岩和粉砂质泥岩的分布范围显著减少,灰质泥岩主要集中在凹陷中部的半深湖及深湖区,粉砂质泥岩集中在工区西南和东北部连片发育,同时泥岩分布范围扩大,工区内连片发育。

最大湖泛面之后进入晚期湖扩体系域早期(LEST-1),其沉积环境为半深湖亚相,湖平面趋于稳定,沉积物类型以大套泥岩为主,夹杂少量粉砂质泥岩薄层。岩性平面预测结果显示,工区内灰质泥岩和粉砂质泥岩含量进一步减少,灰质泥岩主要集中于深湖区内,呈零星分布,粉砂质泥岩主要集中于工区西南部和北部的滨湖区,工区内半深湖及深湖区主要以发育黑色泥岩为主。晚期湖扩体系域晚期(LEST-2)湖平面趋于稳定,为深湖亚相,沉积物以厚层黑色泥岩为主,工区内广泛发育。水体较深致该时期灰质泥岩几乎不发育,但由于陆源物质持续供给,粉砂质泥岩仅局限于西南部和东北部的滨湖区,呈零星分布。

6 结论

1) 基于单井岩心、测井曲线、TOC含量及矿物组

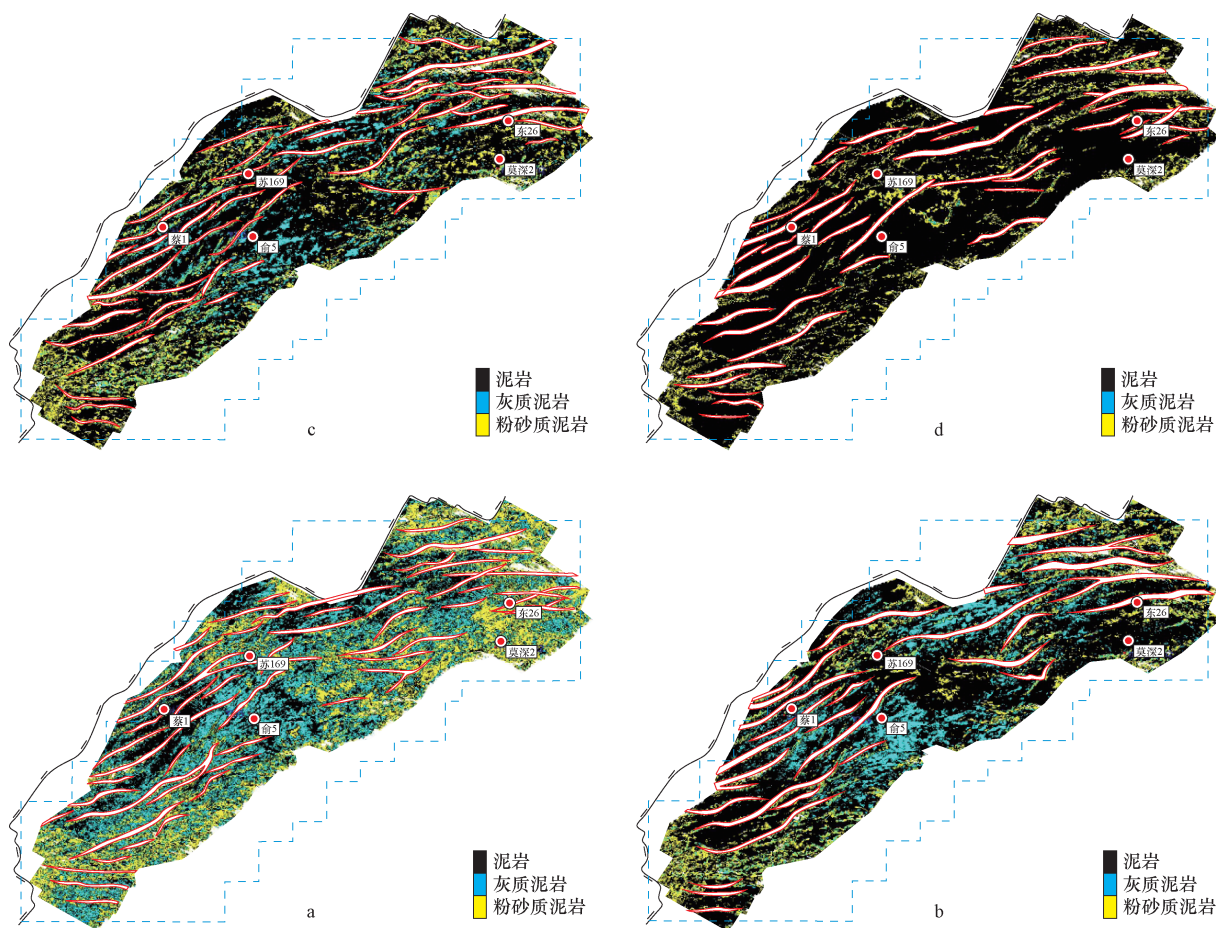


图6 溱潼凹陷阜二段岩相流体概率预测平面图

Fig. 6 Facies and Fluids Probabilities (FFP) prognostic map of the 2nd Member of Funing Formation in Qintong sag

a. 早期湖扩体系域早期 (EEST-1); b. 早期湖扩体系域晚期 (EEST-2); c. 晚期湖扩体系域早期 (LEST-1); d. 晚期湖扩体系域晚期 (LEST-2)

分综合分析可知,阜二段油页岩岩性具有显著的非均质性特征,可划分为灰质泥岩、粉砂质泥岩和泥岩3类岩性组合。

2) 通过单井及地震剖面的地质校验可知,基于叠后反演所开展的岩相流体概率分析对溱潼凹陷阜二段油页岩岩性非均质性的预测结果是比较可靠的。该技术方法在少井甚至无井地区可对油页岩岩性时空展布进行有效预测。

3) 预测结果揭示出早期湖扩体系域初期,工区内以灰质泥岩为主,在凹陷西南部和东北部发育粉砂质泥岩,黑色泥岩主要分布于凹陷西侧,随湖平面上升,灰质泥岩仅发育于凹陷中部,粉砂质泥岩集中发育于凹陷西南和东北两处,此外该时期黑色泥岩在凹陷内连片发育。晚期湖扩体系域时期,凹陷内以黑色泥岩发育为主,灰质泥岩呈零星分布,少量粉砂质泥岩集中发育于工区西南部和北部。

参考文献

- [1] 柳波,郭小波,黄志龙,等.页岩油资源潜力预测方法探讨:以三塘湖盆地马朗凹陷芦草沟组页岩油为例[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(4):1472-1478.
- [2] 武晓玲,高波,叶欣,等.中国东部断陷盆地页岩油成藏条件与勘探潜力[J].石油与天然气地质,2013,34(4):455-462.
- [3] 周德华,焦方正,郭旭升,等.川东南涪陵地区下侏罗统页岩油气地质特征[J].石油与天然气地质,2013,34(4):450-454.
- [4] 梁世君,黄志龙,柳波,等.马朗凹陷芦草沟组页岩油形成机理与富集条件[J].石油学报,2012,33(4):588-594.
- [5] 车长波,朱杰,李富兵,等.全球油气资源形势[J].天然气工业,2010,30(1):1-4.

Liu Bo, Guo Xiaobo, Huang Zhilong, et al. Discussion on prediction method for hydrocarbon resource potential of shale oil; Taking Lucaogou Formation shale oil of Malang sag as case [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44 (4): 1472 - 1478.

[2] 武晓玲,高波,叶欣,等.中国东部断陷盆地页岩油成藏条件与勘探潜力[J].石油与天然气地质,2013,34(4):455-462.

Wu Xiaoling, Gao Bo, Ye Xin, et al. Shale oil accumulation conditions and exploration potential of faulted basins in the east of China [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34 (4): 455 - 462.

[3] 周德华,焦方正,郭旭升,等.川东南涪陵地区下侏罗统页岩油气地质特征[J].石油与天然气地质,2013,34(4):450-454.

Zhou Dehua, Jiao Fangzheng, Guo Xusheng, et al. Geological features of the Lower Jurassic shale gas play in Fuling area, the southeastern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34 (4): 450 - 454.

[4] 梁世君,黄志龙,柳波,等.马朗凹陷芦草沟组页岩油形成机理与富集条件[J].石油学报,2012,33(4):588-594.

Liang Shijun, Huang Zhilong, Liu Bo, et al. Formation mechanism and enrichment conditions of Lucaogou Formation shale oil from Malang sag, Santanghu Basin [J]. Acta Petroli Sinica, 2012, 33 (4): 588 - 594.

[5] 车长波,朱杰,李富兵,等.全球油气资源形势[J].天然气工业,2010,30(1):1-4.

Che Changbo, Zhu Jie, Li Fubing, et al. The status quo and developing trend of global hydrocarbon resources [J]. Natural Gas Industry,

- 2010,30(1):1-4.
- [6] 邹才能,杨智,崔景伟,等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发,2013,40(1):14-26.
Zou Caineng, Yang Zhi, Cui Jingwei, et al. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013,40(1):14-26.
- [7] 刘招君,董清水,叶松青,等. 中国油页岩资源现状[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2006,36(6):869-876.
Liu Zhaojun, Dong Qingshui, Ye Songqing, et al. The situation of oil shale resources in China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006,36(6):869-876.
- [8] Dyni J R. Geology and resources of some world oil-shale deposits [J]. Oil Shale, 2003,20(3):193-252.
- [9] Brendow K. Global oil shale issues and perspectives-Synthesis of the Symposium on Oil Shale Held in Tallinn(Estonia) on 18 and 19 November 2002 [J]. Oil Shale, 2003,20(1):81-92.
- [10] 刘招君,柳蓉. 中国油页岩特征及开发利用前景分析[J]. 地学前缘,2005,12(3):315-323.
Liu Zhaojun, Liu Rong. Oil shale resource state and evaluating system [J]. Earth Science Frontiers, 2005,12(3):315-323.
- [11] 钱家麟,王剑秋,李术元. 世界油页岩资源利用和发展趋势[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2006,36(6):877-887.
Qian Jialin, Wang Jianqiu, Li Shuyuan. World oil shale utilization and its future [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006,36(6):877-887.
- [12] 朱杰,车长波,张道勇. 中国油页岩勘查开发现状与展望[J]. 中国矿业,2012,21(7):1-4.
Zhu Jie, Che Changbo, Zhang Daoyong. Status and prospects of oil shale exploration and development in China [J]. China Mining Magazine, 2012,21(7):1-4.
- [13] Slatt R M, Rodriguez N D. Comparative sequence stratigraphy and organic geochemistry of gas shales: Commonality or coincidence? [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2012,8(SI):68-84.
- [14] Abouelresh M O, Slatt R M. Shale depositional processes: example from the Paleozoic Barnett Shale, Fort Worth Basin, Texas, USA [J]. Central European Journal of Geosciences, 2011,3(4):398-409.
- [15] Sahay, Vinay K. The hydrocarbon potential, thermal maturity, sequence stratigraphic setting and depositional palaeoenvironment of carbonaceous shale and lignite successions of Panandhro, northwestern Kutch Basin, Gujarat, Western India [J]. Central European Journal of Geosciences, 2011,3(4):462-463.
- [16] 胡瑛,张枝焕,方朝合. 溱潼凹陷低熟油生物标志物特征及成熟度浅析[J]. 石油与天然气地质,2005,26(4):512-517.
Hu Ying, Zhang Zhihuan, Fang Chaohe. Biomarker features of low-mature oil in Qintong sag and maturity analysis [J]. Oil & Gas Geology, 2005,26(4):512-517.
- [17] 马晓东,黄薇漪,卢占武. 三维地震解释技术及其在苏北盆地溱潼凹陷的应用[J]. 地球物理学进展,2013,28(4):1925-1934.
Ma Xiaodong, Huang Weiwei, Lu Zhanwu. 3D seismic data interpretation technology and its application in Qintong depression in North Jiangsu basin [J]. Progress in Geophysics, 2013,28(4):1925-1934.
- [18] 陆黄生,秦黎明,刘军,等. 苏北盆地溱潼凹陷断阶带油气运移路径综合分析[J]. 中国地质,2008,35(1):67-78.
Lu Huangsheng, Qin Liming, Liu Jun, et al. Quantitative evaluation of the sealing capacity and identification of the preferred petroleum migration path in the Qintong subbasin, Subei basin [J]. Geology in China, 2008,35(1):67-78.
- [19] 陆黄生,秦黎明,刘军,等. 苏北盆地溱潼凹陷油气运聚模式[J]. 地质论评,2009,55(3):395-405.
Lu Huangsheng, Qin Liming, Liu Jun, et al. Petroleum migration and accumulation in Qintong Sag, North Jiangsu Basin [J]. Geological Review, 2009,55(3):395-405.
- [20] 贺君玲,邓守伟,陈文龙,等. 利用测井技术评价松辽盆地南部油页岩[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2006,36(6):909-914.
He Junling, Deng Shouwei, Chen Wenlong, et al. Evaluation of oil shale in the southern Songliao Basin using logging techniques [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006,36(6):909-914.
- [21] 张晋言. 页岩油测井评价方法及其应用[J]. 地球物理学进展,2012,27(3):1154-1162.
Zhang Jinyan. Well logging evaluation method of shale oil reservoirs and its applications [J]. Progress in Geophysics, 2012,27(3):1154-1162.
- [22] 朱建伟,赵刚,刘博,等. 油页岩测井识别技术及应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2012,42(2):289-295.
Zhu Jianwei, Zhao Gang, Liu Bo, et al. Identification technology and its application of well-logging about oil shale [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012,42(2):289-295.
- [23] 黄文彪,邓守伟,卢双舫,等. 泥页岩有机非均质性评价及其在页岩油资源评价中的应用——以松辽盆地南部青山口组为例[J]. 石油与天然气地质,2014,35(5):704-711.
Huang Wenbiao, Deng Shouwei, Lu Shuangfang, et al. Shale organic heterogeneity evaluation method and its application to shale oil resource evaluation—a case study from Qingshankou Formation, southern Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014,35(5):704-711.
- [24] Dhanam K, Kumar P S, Misaiah D, et al. High-resolution seismic imaging of the Sohagpur Gondwana basin, central India: Evidence for syn-sedimentary subsidence and faulting [J]. Journal of Earth System Science, 2013,122(6):1495-1505.
- [25] Li L, Clift P D, Nguyen H T. The sedimentary, magmatic and tectonic evolution of the southwestern South China Sea revealed by seismic stratigraphic analysis [J]. Marine Geophysical Research, 2013,34(3-4SI):341-365.
- [26] Karimpouli S, Hassani H, Nabi-Bidhendi M, et al. Application of probabilistic facies prediction and estimation of rock physics parameters in a carbonate reservoir from Iran [J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2013,10:15008.
- [27] 宋志峰,石万忠,孔敏,等. 三塘湖盆地马朗凹陷卡拉岗组裂缝带预测[J]. 石油地球物理勘探,2010,45(5):714-719.
Song Zhifeng, Shi Wanzhong, Kong Min, et al. Fracture zone prediction for the Kalagang Formation in the Malang Depression, Santanghu Basin [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010,45(5):714-719.