

马清, 覃军, 徐靖琦, 等. 丽水凹陷基岩岩性分布预测——以丽水 A 洼为例[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(7): 87-96.

MA Qing, QIN Jun, XU Jingqi, et al. Prediction of lithologic distribution of basement in the Lishui Sag: a case study of the Lishui Sub-sag A[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(7): 87-96.

# 丽水凹陷基岩岩性分布预测

## ——以丽水 A 洼为例

马清<sup>1</sup>, 覃军<sup>1</sup>, 徐靖琦<sup>1</sup>, 常文琪<sup>1</sup>, 张艳红<sup>2</sup>

(1 中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335; 2 斯伦贝谢科技服务(北京)有限公司, 北京 100016)

**摘要:**东海陆架盆地丽水凹陷基岩潜山十分发育, 钻井已证实其含油气性, 勘探潜力巨大。综合现有基岩岩芯、铸体薄片、测井、测年、三维地震资料, 在构建基岩岩相-地震相模板及岩石物理分析的基础上, 对丽水凹陷基岩岩性开展定性和半定量预测, 进而预测岩性平面分布特征。丽水凹陷基岩主要由片麻岩、花岗片麻岩、花岗岩组成, 片麻岩为古元古界变质岩陆核, 花岗岩来自中生代岩浆, 沿深大断裂上涌侵入。地震剖面上片麻岩表现为中-高频, 中-强振幅, 同相轴连续性、成层性好; 花岗岩表现为中-低频, 弱-中振幅, 呈杂乱反射; 花岗片麻岩地震相介于前二者之间。岩石物理分析结果显示, 密度参数对岩性区分效果最好, 叠前密度反演能较好地半定量预测基岩分布特征。研究表明, 丽水 A 洼主体基岩纵向呈片麻岩上覆花岗岩的二元结构特征; 平面上不同构造单元的基岩顶面岩性各异, 凸起区花岗岩剥蚀程度高, 基岩为片麻岩或花岗片麻岩, 洼槽区缺乏深大断裂, 为原始区域片麻岩基底, 其他区域为花岗岩。

**关键词:** 丽水凹陷; 基岩; 地震相; 叠前反演; 岩性预测

中图分类号: P744.4; P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.289

## 0 引言

基底是含油气盆地重要的研究单元, 其形态、结构及岩性对盆地构造演化、沉积充填、潜山油气聚集成藏具有重要影响<sup>[1-2]</sup>。现已发现基岩潜山油气藏储层岩性主要有变质岩、花岗岩、火山岩以及碳酸盐岩, 如乍得 Bongor 盆地前寒武系花岗岩-片麻岩潜山油气藏<sup>[3]</sup>、渤海湾盆地渤中凹陷渤中 19-6 片麻岩潜山气田<sup>[4]</sup>、珠江口盆地惠州 26-6 花岗岩油田<sup>[5]</sup>等。基底岩性及其平面分布规律是含油气盆地基岩潜山油气藏勘探的重要研究内容。近年来, 随着渤海湾盆地及珠江口盆地在基岩潜山陆续获得中大型油气发现, 近海含油气盆地再次掀起基岩潜山领域勘探热潮。

丽水凹陷是以新生代沉积为主的含油气盆地, 基岩潜山十分发育, 凹陷内第 1 口探井的主要目的层即为基岩潜山。前人对丽水凹陷及其周边基岩岩性的研究已取得系列成果, 刘建华等<sup>[6]</sup>认为东海陆架盆地基岩主要由前震旦纪古老变质岩和中生代火山岩组成; 王长势等<sup>[7]</sup>根据区域二维地震和钻井资料将丽水凹陷及邻区基底岩性总结为变质岩、花岗岩、火山岩、沉积岩、火山-沉积岩互层 5 种类型, 且凹陷内以变质岩和火山岩-沉积岩互层为主; 侯凯文<sup>[8]</sup>认为凹陷西南部残存大量白垩系甚至侏罗系。本次研究靶区丽水 A 洼低凸起基岩潜山十分发育, 勘探潜力较大, 而基岩岩性识别是该区油气勘探的基础, 对寻找有利目标区和指明勘探方向至关重要。现有技术手段对盆地基岩岩性的认识除野外露头观察和钻井取芯外, 更多的是依靠重、磁、电等地球物理手段开展预测<sup>[9]</sup>, 如李成立等<sup>[10]</sup>应用视密度、视磁化率及其相关系数通过神经网络方法对松辽盆地滨北地区开展基岩预测; 王耀辉等<sup>[11]</sup>通过建立不同重、磁、电异常组合与岩相岩性之间的对应关系识别伊犁盆地巩乃斯拗陷基岩

收稿日期: 2022-10-17

资助项目: 中海油“七年行动计划”东海专项课题二“丽水凹陷在生产气田保产及新领域勘探开发关键技术研究”(CNOOC-KJ135ZDXM39SH02)

作者简介: 马清(1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事海上油气勘探方面的研究工作。E-mail: maqing2@cnooc.com.cn

岩性;尹成明等<sup>[12]</sup>利用CEMP勘探结合重、磁资料开展柴达木盆地东坪地区基岩岩性预测,这些研究均取得了较好的应用效果。本文根据丽水凹陷大面积三维地震覆盖优势,以丽水A洼为例,结合已钻井实物资料,尝试从叠后岩相-地震相定性和叠前密度反演半定量2个角度联合开展基岩岩性预测,总结丽水A洼基岩平面分布规律,以期为该区域基岩潜山油气藏勘探潜力评价提供借鉴。

### 1 区域地质概况

丽水凹陷位于东海陆架盆地西部坳陷带西南部<sup>[13-14]</sup>,北接椒江凹陷,西邻闽浙隆起,东南为雁荡凸起所限,整体呈NE走向。受灵峰低凸起分割,凹陷呈“东断西超、两洼夹一隆”的复式半地堑结构特征<sup>[15]</sup>。本文研究靶区丽水A洼位于丽水凹陷丽西洼陷北部(图1)。钻井和地震资料分析认为,丽水凹陷地层主要为新生代碎屑岩沉积,最大沉积厚度约12 km,自下而上发育中生界上白垩统石门潭组,新生界古新统月桂峰组、灵峰组、明月峰组,始新统瓯江组、温州组,中新统龙井组、玉泉组、柳浪组,上新统三潭组以及更新统东海群<sup>[16]</sup>。

现有研究认为,东海陆架盆地在加里东运动晚期已形成统一的陆核<sup>[17]</sup>。至晚白垩世(83.6 Ma)在欧亚板块与太平洋板块的碰撞、俯冲、弧后扩张以及印度板块与欧亚板块之间的汇聚、碰撞、楔入的

“远程效应”共同叠加、复合作用下产生右旋拉张应力<sup>[18-22]</sup>,基底拉张发育一系列NE-SW走向西倾控洼大断裂,盆地自此形成并开始发展<sup>[23-24]</sup>。控洼大断裂下降盘逐渐演化为丽西洼陷和丽东洼陷,基岩之上接受沉积;控洼大断裂上升盘逐渐演化成灵峰和仙桥等低凸起,基岩出露水上形成潜山,直至始新世(56.5 Ma)拗陷期浸入水下开始接受沉积<sup>[25]</sup>。

### 2 钻井基岩特征

#### 2.1 岩性特征

丽水凹陷共有10口探井钻入基岩,累计进尺1 239 m,其中7口井未见油气显示仅揭示基岩表层。钻揭基岩主要为花岗岩、花岗片麻岩和片麻岩,局部见英安岩。片麻岩主要成分为长石、石英和黑云母,长石和石英含量之和>60%,其中,黑云母斜长片麻岩长石含量>30%,具有粒状、斑状变晶结构,片麻状构造,见于灵峰低凸起构造高部位,F1和L36井钻揭超300 m。花岗片麻岩岩石由长石、石英及黑云母组成,矿物定向排列,具有片麻理,仅见于灵峰低凸起北段W20井。雁荡凸起及丽西洼陷缓坡钻揭均为花岗岩,成分以长石、石英为主,石英/(石英+长石)可达60%,长石类以斜长石为主,局部长石绢云母化,可见半自形粒状结构、块状构造以及花岗结构(图2)。

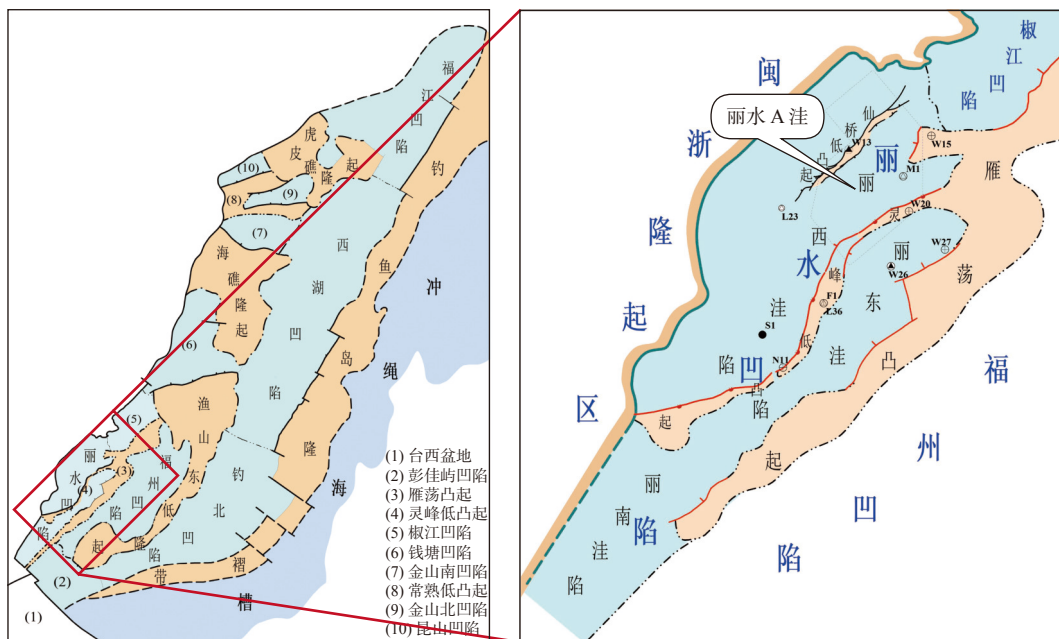
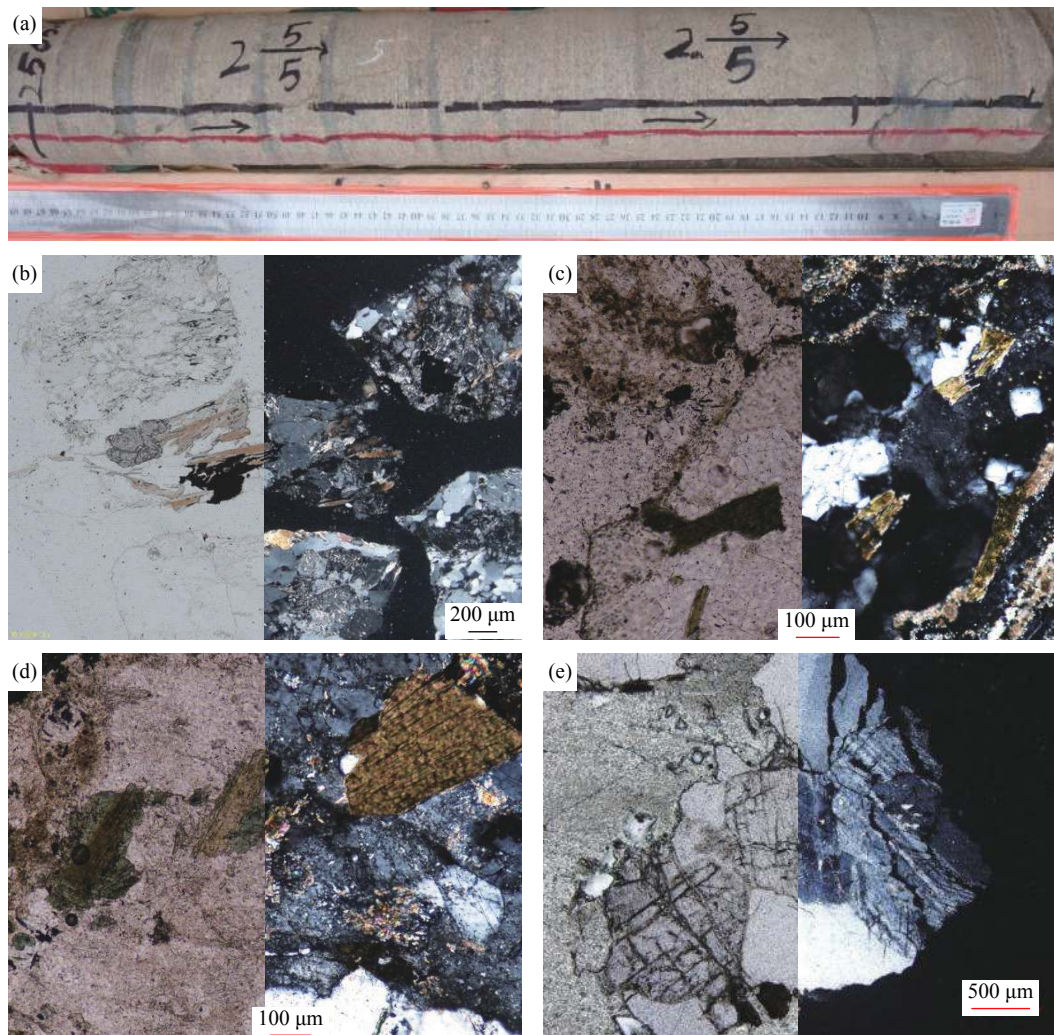


图1 丽水凹陷构造位置

Fig.1 Location and tectonic elements of the Lishui Sag



(a)L36 井, 2 565~2 566 m, 岩芯; (b)L36 井, 2 968~2 970 m, 细粒石榴二云母片麻岩; (c)W20 井, 2 301~2 304 m, 黑云花岗片麻岩; (d)N11 井, 2 697~2 700 m, 花岗岩; (e)W15 井, 1 912~1 915 m, 二长花岗岩

图 2 丽水凹陷基岩岩性及薄片

Fig.2 Petrographic illustrations of core and thin sections of the basement rocks in the Lishui Sag

## 2.2 成岩时代

对丽水凹陷钻井揭示的基岩做过多批次测年, 研究显示基岩岩性与时代有较好的集中对应关系。对 L36 井片麻岩进行单颗粒锆石 U-Pb 同位素年代测试显示: 上交点( $2\ 097 \pm 48$ ) Ma, 代表片麻岩原岩成岩时代或片麻岩最早变质岩成岩时代; 下交点 230 Ma, 代表片麻岩形成后期的一次变质时代。激光 ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学测定( $1\ 848.0 \pm 3.0$ ) Ma 可代表片麻岩成岩时代。Rb-Sr 同位素地质年代学研究选取有代表性的  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  值和  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值相对变化大的样品, 通过 ISPLLOT 等时线年龄计算程序, 得到年龄值  $T=(1\ 851.5 \pm 8.4)$  Ma,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始值为  $0.713\ 38 \pm 0.000\ 17$ , 与 U-Pb 激光 ICP-MS 所测得年代一致, 成岩年代为古元古代 (Paleo-Proterozo-

ic) 中晚期。W26 井花岗岩 LA-ICP-MS 测试结果显示, 大多数锆石颗粒具有相对一致的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄, 分布介于 177~181 Ma, 而多口井花岗岩测年显示其成岩时代介于 167~181 Ma, 与华南中生代出露花岗岩成岩年代一致, 为燕山早期岩浆侵入成因的中生代花岗岩 (表 1)。

## 2.3 测井响应

不同岩性测井响应特征较为集中, 片麻岩主要表现为低声波时差、高密度、低—中伽马的特征; 花岗岩表现为低—高声波时差、中等密度、中—高伽马; 花岗片麻岩为低声波时差, 密度处于花岗岩与片麻岩之间 (图 3), 对测井数据交汇大体上可划出片麻岩区、花岗岩区和花岗片麻岩区 (4)。基岩顶面风化溶蚀带的发育使各井声波时差出现不同程

表 1 丽水凹陷基岩锆石 U-Pb 测年

Table 1 Zircon U-Pb dating of the basement rocks in the Lishui Sag

井名	位置	深度/m	岩性	年龄/Ma	测试方法	活动期次
M1	雁荡凸起	2 927~2 983		167.2±2.3	SHRIMP锆石U-Pb法	
W26	丽东洼陷	4 084~4 090		181±1		
N11	灵峰低凸起	2 682~2 691	花岗岩	171±2	LA-ICP-MS锆石U-Pb法	燕山运动早期
W15	雁荡凸起	1 881~1 887		171±2		
W20	灵峰低凸起	1 892~1 912		171±1		
W20	灵峰低凸起	2 250~2 300	花岗片麻岩	204±4		
F1		2 373~2 530		1 680±20	LA-ICP-MS锆石U-Pb	
F1	灵峰低凸起	2 565~2 566	片麻岩	1 832±12.9		加里东运动
L36		2 750~2 884		1 848±3.0	ICP-MS U-Pb测年	
L36		2 494~2 966		1 851.5±8.4	Rb-Sr 同位素测年	

度的齿化,其中 L36 井发育风化溶蚀带厚度超百米。

### 2.4 阻抗特征

基底作为沉积层系的底界面,正常情况下以连续强波峰反射出现在地震剖面上。丽水凹陷由于灰岩、凝灰岩质砂岩等特殊岩性的发育,基底界面

的反射特征不唯一。现已揭示基岩上覆地层岩性组合主要为泥岩、砂泥岩互层以及灰岩。对基岩及上覆地层岩石物理分析表明,基岩与沉积岩纵波阻抗规律性好,片麻岩平均纵波速度达 5 736 m/s,平均密度(2.72 g/cm<sup>3</sup>)为所有岩性中最大,纵波阻抗最大;灰岩平均纵波速度(5 796 m/s)为所有岩性中最

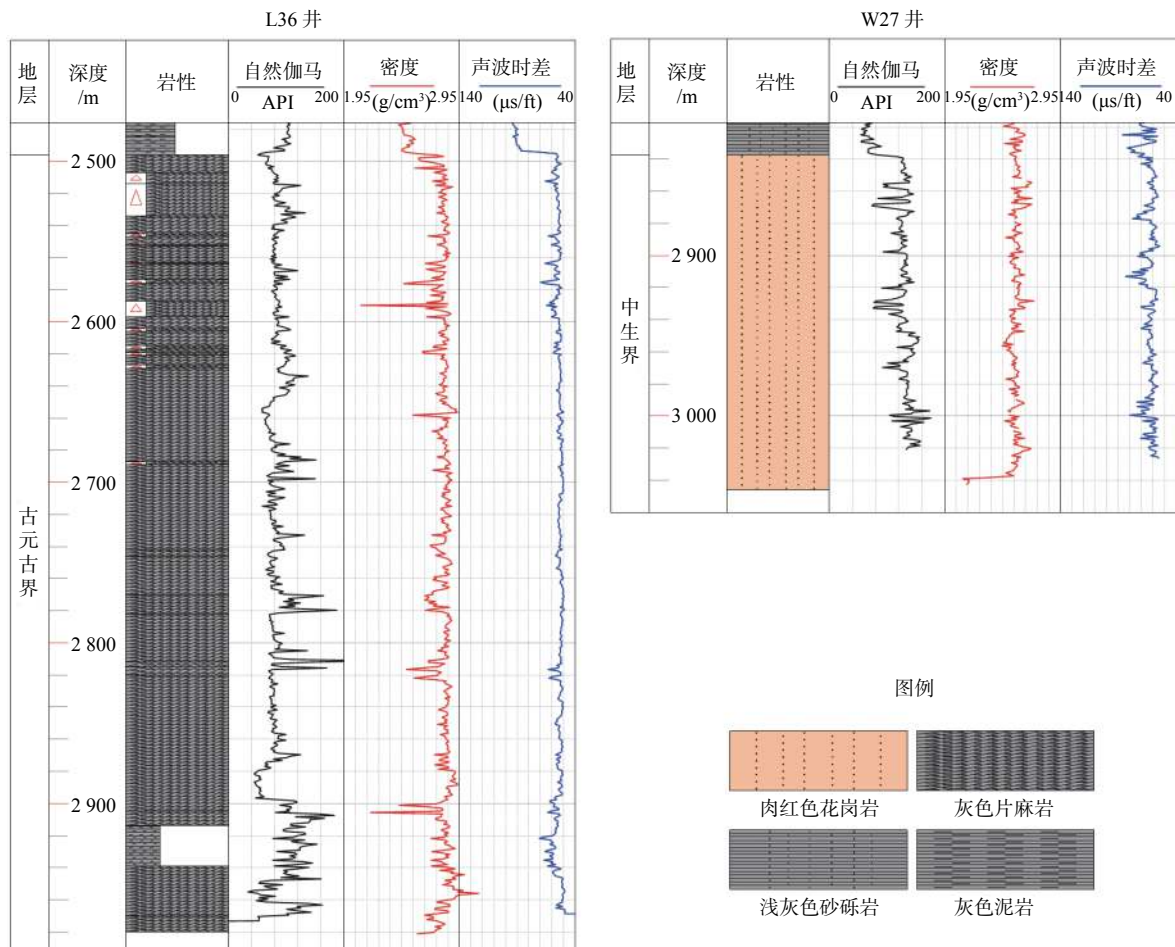


图 3 丽水凹陷基岩测井响应特征

Fig.3 The petrophysical characteristics of the basement rocks in the Lishui Sag

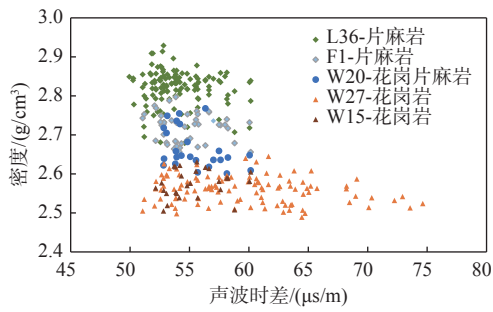


图 4 丽水凹陷基岩声波时差-密度交汇

Fig.4 The acoustic-density cross-plot of basement rocks in the Lishui Sag

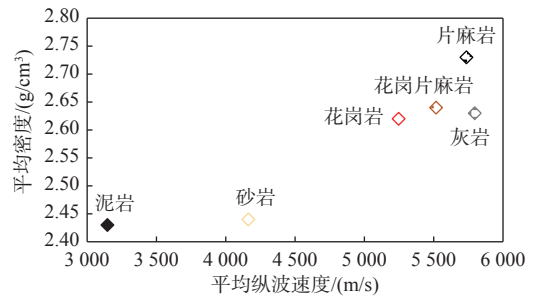


图 5 不同岩性平均纵波速度及密度分布

Fig.5 The cross-plot of average P-wave velocity and density of different rocks

大, 平均密度  $2.64 \text{ g/cm}^3$ , 阻抗大于花岗岩; 沉积岩中泥岩平均纵波速度为  $3146 \text{ m/s}$ , 明显小于砂岩, 泥岩纵波阻抗最小(图 5)。

以丽水 A 洼三维区 M1 井构造背景建立的地质模型正演模拟表明, 基岩上覆岩性决定基底反射特征, 基岩岩性对基底振幅影响相对较小。当上覆

地层为砂岩或泥岩时, 基底为强波峰反射, 与 M1 井花岗岩基底反射特征一致, 其中, 片麻岩基底反射最强, 花岗岩最弱; 当上覆地层为灰岩时, 强波峰为灰岩顶面反射, 基底表现为弱反射特征, 花岗岩基底甚至表现为波谷反射(图 6)。

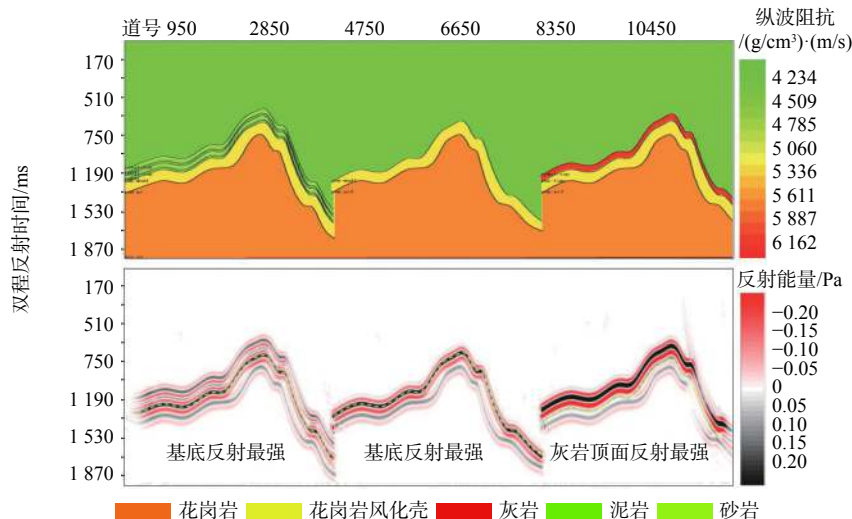


图 6 花岗岩基岩与不同岩性上覆地层正演模拟反射特征

Fig.6 The characteristics of simulated reflections of granite and overlying strata of different lithologies

### 3 基岩地球物理预测

#### 3.1 叠后定性预测

##### 3.1.1 岩相-地震相特征

“相”是地质体中能反应成因的地质特征的总和<sup>[26]</sup>, 基岩岩相能揭示基岩时空分布规律和不同岩性组合之间的成因联系, 不同的岩相指示着不同岩性、物性特征, 其对应的地震反射在振幅、频率、成层性、同相轴连续性以及地层速度、结构特征即地震相各异<sup>[27]</sup>。花岗岩作为最为常见的侵入岩, 成岩

环境相对稳定, 岩体整体较为致密, 内部无特定的阻抗界面, 地震剖面上通常为杂乱反射特征; 在应力场作用下易破碎, 可形成与应力背景匹配的构造裂隙, 地震剖面上可见断面波。片麻岩为强挤压作用下变形形成片麻状构造的变质岩, 岩体内部节理或构造裂隙的发育, 通常发育一系列阻抗差异界面, 地震剖面上具有较为规律的强界面。在井震标定下, 根据已钻井岩性与其地震剖面反射特征构建不同岩相的地震相特征模板<sup>[28]</sup>, 通过对三维区横向基岩地震相与模板类比从而反向预测岩性的分布, 是三维地震叠后成果资料定性预测基岩岩性的思路和方法。受采集方式和处理方法的影响, 不同批次

采集的地震资料在频带宽度、能量强弱以及分辨率上存在较大的差异,难以统一标准定量评价基岩地震相关相参数,同一批次地震资料范围内不同岩性地震相参数可定量对比,而不同批次地震资料间可开展定性类比研究。

对丽水凹陷10口井基岩井震结合综合分析表明,丽水凹陷基岩岩相-地震相特征清晰。在宽频斜缆采集的丽水南三维地震资料上,L36井片麻岩层系波峰振幅值介于1.8~5.7,有效频宽为4~49 Hz,地震相表现为中-强振幅,中-高频,同相轴连续性好,内部成层性强,波组与上覆沉积地层呈大角度不整合接触;N11井花岗岩层系波峰振幅值介于0.9~2.7,有效频宽3~20 Hz,地震相表现为弱-中等振幅,中-低频,连续性差-中,呈杂乱反射,无明显成层性,波组与上覆沉积地层呈不整合接触。而常规拖缆采集的丽水北三维地震资料品质上与丽水南三维差异明显,工区内W20井花岗片麻岩地层波峰振幅值介于1.5~4.8,有效频宽4~42 Hz,地震相在振幅、频率、成层性、同相轴连续性处于花岗岩和片麻岩之间,呈2种地震相之间过渡特征,与上覆地层呈整合接触(表2)。

3.1.2 多属性聚类分析岩性预测

运用神经网络先进技术和方法对地震属性及所反映的地质特征进行分析解释,可以实现地震道、多属性数据体等时窗层段内地震相自动划分,不同颜色代表不同类型的地震相特征,颜色相近的区域更接近为同一岩相,结合井上岩性即可对面上

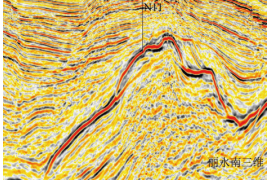
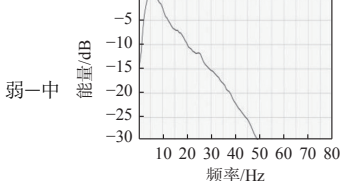
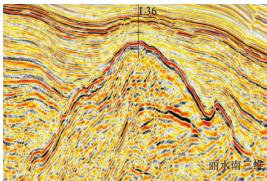
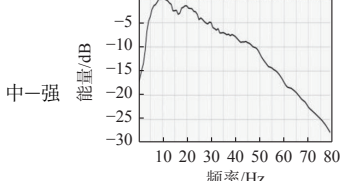
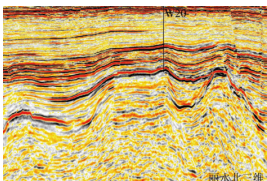
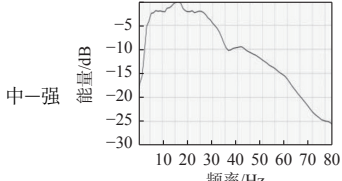
基岩开展预测。丽水A洼丽水北三维区范围内有2口井钻遇基岩,在基底(Tg)最大振幅平面图上,W20井区花岗片麻岩振幅强度较M1井区花岗岩强,与上文正演结论一致,且基底振幅强弱具有明显的分带性(图7a)。对基底之下30~300 ms时窗提取振幅、频率及相位类地震属性综合分析显示,平均波峰振幅(average peak value)、平均瞬时频率(average instantaneous frequency)以及零相位数(number of zero crossings)等地震属性在平面上分布规律明显,且与基底最大振幅属性有较好的相关性(图7b、c、d)。应用人工神经网络技术对基底最大振幅、基岩平均波峰振幅、平均瞬时频率、零相位数4个属性进行有井约束聚类分析,并设置3类地震相类型输出。多属性聚类分析结果显示:丽水A洼东部凸起区基岩主要表现为中-高振幅、中-高频率地震相特征,预测岩相以片麻岩、花岗片麻岩为主,局部发育花岗岩侵入;西部缓坡基岩表现为中-高振幅、中-低频地震相特征,预测岩相以花岗岩、花岗片麻岩为主;洼槽区整体为中等平均波峰振幅、高频地震相特征,结合该区断裂发育程度及埋深对反射能量的影响,预测其岩相为古元古界片麻岩(图7e)。

3.2 叠前半定量预测

基于岩性-地震相模板开展的定性预测能快速对目标区岩性做出类比判断,但实际应用过程中会存在一些制约和不足:①不同批次地震资料品质差

表2 丽水凹陷基岩岩相-地震相模板

Table 2 The facies-seismic model of basement rocks in the Lishui Sag

岩性	发育位置	实例	振幅	频谱	连续性	成层性	波组接触关系
花岗岩	灵峰低凸起翼部(南)		弱-中		差	中-差	角度不整合
片麻岩	灵峰低凸起高部位		中-强		中-高	好	大角度不整合
花岗片麻岩	灵峰低凸起翼部(北)		中-强		中等	中-好	整合接触

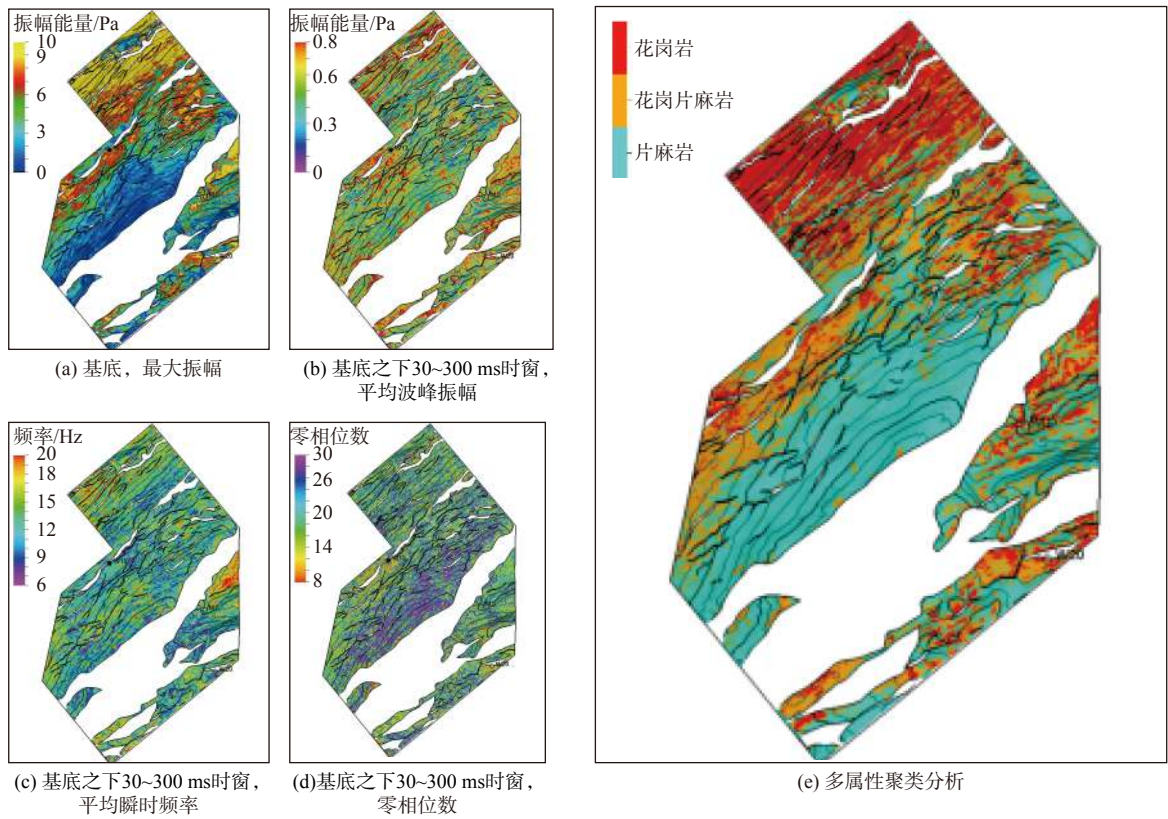


图 7 丽水凹陷 A 洼基岩平面属性及聚类分析结果

Fig.7 Surface attributes and clustering analysis of the basement in the Lishui Sub-sag A

异导致基岩成像可类比性差;②同批次地震资料范围内埋深不同导致基岩地震反射波组能量差异大;③不同基岩地震相特征近似;④更为精确的岩性平面及纵向分布需求。在已有基岩声波时差(纵波和横波)、密度等测井数据及地震资料的基础上,建立从岩石物理特征到地震弹性参数的直接联系,开展更为有效的定量岩性预测显得很有必要。本次研究在岩相-地震相定性预测基岩分布的基础上,进一步开展了更为精细的叠前同步反演半定量预测岩性,即①开展岩石物理交汇分析获取基岩敏感弹性参数;②使用优化后的叠前角道集,结合已钻井测井资料,开展叠前同步反演;③根据基岩敏感弹性参数体预测岩性分布。

### 3.2.1 岩石物理分析

岩石密度差异影响因素主要有岩性、埋深、地层压力等,相较于碎屑岩,基岩更为致密,其密度差异主要取决于岩性。已钻井电测得到的纵波阻抗、横波阻抗、密度、纵横波比交互对比显示,纵波阻抗、横波阻抗、纵横波比以及自然伽马对基岩岩性识别效果较差,而密度数据能够很好地区分基岩岩性。根据岩性密度概率分布特征,对 3 种类型基岩密度

阈值界定如下:片麻岩主要分布在  $2.72 \text{ g/cm}^3$  以上,花岗岩分布于  $2.63 \text{ g/cm}^3$  以下,花岗片麻介于  $2.63 \sim 2.72 \text{ g/cm}^3$  (图 8),可选择密度参数开展叠前同步反演定量-半定量,预测基岩岩性分布特征。

### 3.2.2 叠前同步反演方法

叠前同步反演作为计算岩石物性参数的重要技术广泛运用于油气勘探与开发中<sup>[29]</sup>。本次岩性半定量研究开展的叠前同步反演是基于 Zoeppritz 方程的近似 Fatti 方程<sup>[30]</sup>,利用纵波、横波、密度等测井资料结合不同炮检距道集数据开展的反演<sup>[31]</sup>,该方法能同步反演纵波阻抗、横波阻抗和密度信息,进而半定量评价基岩岩性的分布特征。Zoeppritz 方程的近似 Fatti 方程的形式如下:

$$R_P(\theta) = c_1 R_P + c_2 R_S + c_3 R_D$$

式中:  $c_1 = 1 + \tan^2\theta$ ;

$$c_2 = -8K \sin^2\theta$$

$$c_3 = 2K \sin^2\theta - \frac{1}{2} \tan^2\theta$$

$$K = \left( \frac{V_S}{V_P} \right)^2$$

$$R_P = \frac{1}{2} \left[ \frac{\Delta V_P}{V_P} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right]$$

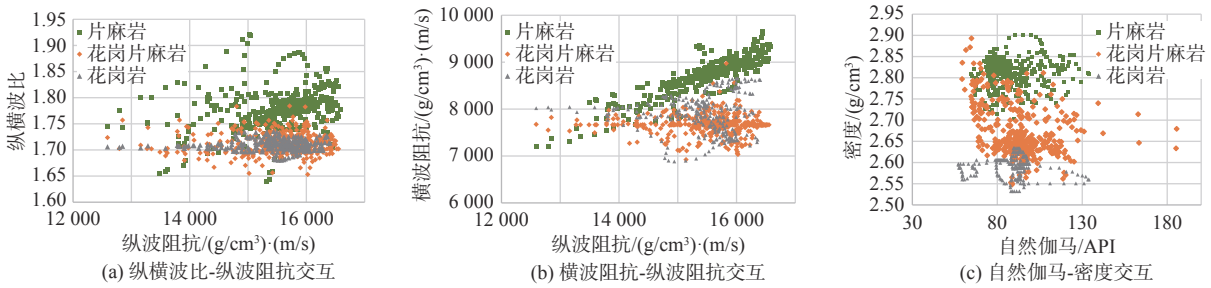


图8 基岩岩石物理分析 ( M1、W20、L36、F1 井 )

Fig.8 The physical analysis of basement rocks (Wells M1, W20, L3, and F1)

$$R_s = \frac{1}{2} \left[ \frac{\Delta V_s}{V_s} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right];$$

$$R_D = \frac{\Delta \rho}{\rho};$$

$\theta$  为入射角值;

$\rho$  为密度;

$V_p$ 、 $V_s$  分别为纵波、横波速度。

在少井情况下,该方法预测基岩岩性需重点关注基底之下地震资料保真处理和反演低频模型的建立。对地震道集数据保真处理包括开展去噪、多次波压制、道集残余道拉平以及能量补偿,通过质控道集处理前后波组能量和 AVO 特征确保道集质量满足反演要求。研究区由于参数井少且基岩进尺短,在建立地质模型时以基底形态为基础,结合上述聚类分析平面属性与井上粗化的密度数据,利用协同克里金算法<sup>[32-34]</sup>建立密度低频模型,当模型密度数据分布特征与粗化到模型后的的密度数值分布形态较为一致时,低频模型视为可靠。

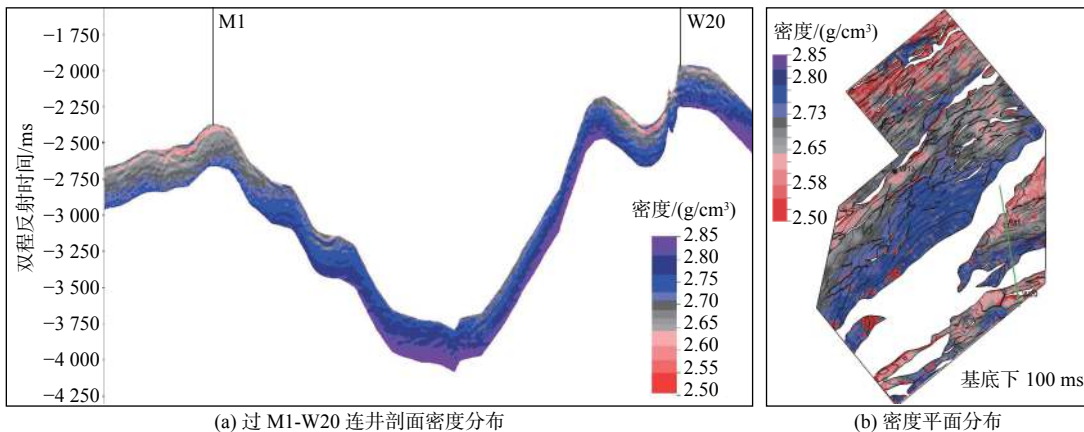
### 3.2.3 岩性半定量预测

丽水 A 洼丽水北三维区开展叠前同步反演获取的密度体与井上数据对比显示,本次叠前同步密度反演不仅精度高,而且能有效反映基岩纵向、横向上的密度变化趋势。过研究区 M1 至 W20 井密度

反演剖面显示, M1 井区基岩顶部密度约  $2.62 \text{ g/cm}^3$ ,与井上花岗岩实测平均值一致,且低密度基岩厚度和横向分布存在较大变化,预测花岗岩之下为花岗片麻岩、片麻岩,井区基岩呈三元结构特征; W20 井区基岩顶部密度值  $2.66 \text{ g/cm}^3$ ,与井上花岗-片麻岩基底平均密度吻合较好,井区横向局部小规模发育低密度值的基岩,预测纵向上呈花岗片麻岩-片麻岩二元结构;井区之间的深洼区,整体密度较大,预测为古元古界片麻岩基岩(图 9a)。三维区平面密度分布显示,密度高值片麻岩主要位于丽水 A 洼洼槽区以及灵峰低凸起;密度低值的花岗岩为丽水 A 洼最为广泛分布的基岩,西部缓坡高部位和雁荡凸起基岩以这种岩性为主,灵峰、仙桥低凸起同样局部发育;灵峰、仙桥低凸起周边密度数据整体居中,岩性以花岗片麻岩为主(图 9b)。

## 4 基岩演化与平面分布特征

综合实钻揭示及地震预测结果,丽水 A 洼基岩纵向上具有“双岩性”结构特征。推测基岩演化过程为:凹陷原始基岩为古元古界片麻岩,至中生代早期,欧亚大陆板块与太平洋板块、菲律宾板块活动加剧,岩浆沿深大断裂上涌侵入浅层,形成围绕



(a) 过 M1-W20 连井剖面密度分布

(b) 密度平面分布

图9 丽水 A 洼基岩密度反演连井剖面及密度平面分布特征

Fig.9 The well tie profile and plane distribution characteristics of bedrock density inversion in the Lishui Sub-sag A



大断裂分布的变质岩-花岗岩-变质岩的岩性组合; 至中生代晚期, 丽水凹陷开始裂陷演化, 表层基岩历经约 150 Ma 风化剥蚀殆尽, 基岩纵向呈花岗岩-变质岩二元结构特征; 凹陷断陷过程中灵峰、仙桥等低凸起持续隆升, 构造高部位花岗岩剥蚀后使变质岩再次出露, 形成单一变质岩基岩结构特征。

根据三维地震叠后定性、叠前半定量岩性预测结果, 在区域基岩认识的基础上总结丽水 A 洼基岩岩性分布: 花岗岩主要分布于西部缓坡、雁荡凸起等深大断裂发育区, 古元古界片麻岩主要分布于洼槽区及灵峰低凸起局部高部位, 灵峰低凸起由于凹陷构造演化过程中持续抬升作用, 构造高部位花岗岩剥蚀片麻岩出露, 而灵峰低凸起翼部、仙桥低凸起等西部缓坡中垒区花岗岩剥蚀程度相对弱, 基岩岩性以花岗岩片麻岩为主(图 10)。

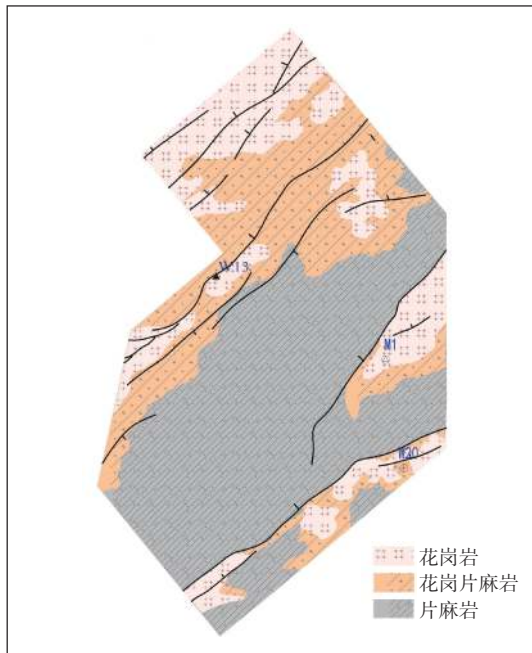


图 10 丽水 A 洼基底岩性分布

Fig.10 The plane distribution of the basement lithologies in the Lishui Sub-sag A

2021 年在丽水 A 洼仙桥低凸起中部新钻 W13 井, 钻入潜山揭示基岩为花岗岩, 成岩时代 173 Ma, 与钻前基于岩相-地震相和叠前密度反演 2 种方法预测岩性结果一致。

## 5 结论

(1) 丽水凹陷基岩岩性主要包括中生界花岗岩和古元古界片麻岩两大类, 其中, 古元古界片麻岩为原始基底, 中生代早期岩浆沿深大断裂侵入片麻岩形成花岗岩, 中生代末凹陷进入初始裂陷阶段后,

花岗岩之上的片麻岩遭受剥蚀而出露。片麻岩主要分布于灵峰低凸起构造高部位以及洼槽区, 花岗岩围绕深大断裂发育, 西部斜坡及凸起区均有发育, 灵峰、仙桥等低凸起主要为花岗片麻岩基底。

(2) 丽水凹陷片麻岩地震相特征为中—强振幅、中—高频率、成层性好、同相轴连续性好, 花岗岩为中—弱振幅、中—低频率、成层性差、杂乱反射, 花岗岩片麻岩则介于前两者之间。根据基岩地震相差异通过神经网络聚类分析能较好地定性预测基岩岩性。密度对不同岩性基岩有较好的区分效果, 叠前同步密度反演能较好地半定量预测基岩岩性, 且预测结果与地震相定性预测认识一致。

## 参考文献:

- [1] 王国纯. 东海盆地前第三系与古潜山油气藏[J]. 石油勘探与开发, 1991, 18(2): 11-18.
- [2] 张厚福, 方朝亮, 高先志, 等. 石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 281.
- [3] 李威, 窦立荣, 文志刚, 等. 乍得Bongor盆地潜山油气成因和成藏过程[J]. 石油学报, 2017, 38(11): 1253-1262.
- [4] 王德英, 王清斌, 刘晓健, 等. 渤海湾盆地海域片麻岩潜山风化壳型储层特征及发育模式[J]. 岩石学报, 2019, 35(4): 1181-1193.
- [5] 施和生, 高阳东, 刘军, 等. 珠江口盆地惠州26洼“源-汇-聚”特征与惠州26-6大油气田发现启示[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 777-791.
- [6] 刘建华, 方银霞, 吴水根. 东海陆架盆地前新生代基底探讨[C]// 中国地球物理学会第22届年会论文集. 成都: 四川科学技术出版社, 2006: 332.
- [7] 王长势, 朱伟林, 陈春峰, 等. 东海丽水-椒江新生代凹陷基底的岩性及分布[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(4): 636-644.
- [8] 侯凯文. 东海盆地丽水-椒江凹陷前新生代岩石特征及基底新认识[J]. 科技创新与应用, 2021, 8(12): 1-8.
- [9] 付光明, 严加勇, 张昆, 等. 岩性识别技术与进展[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(1): 26-40.
- [10] 李成立, 崔瑞华, 刘益中. 盆地基底岩性的综合地球物理预测方法: 以松辽盆地滨北地区基底岩性预测为例[J]. 地球物理学报, 2011, 52(2): 491-498.
- [11] 王耀辉, 姜忠诚, 石东阳, 等. 高精度重磁电资料在伊犁盆地坳陷斯坳陷基底岩性岩相识别中的应用[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(2): 793-799.
- [12] 尹成明, 张弘强, 杨大兵, 等. 柴达木盆地东坪地区侏罗系分布及基岩岩性预测[J]. 地质通报, 2016, 35(2/3): 211-220.
- [13] 陈志勇, 吴培廉, 吴志轩. 丽水凹陷石油地质特征及勘探前景[J]. 中国海上油气(地质), 2000, 14(6): 384-391.
- [14] 刘春锋, 周平, 熊志武, 等. 东海丽水凹陷西次凹古新统明月峰组下段砂体成因分析[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(7): 31-39.
- [15] 陈晓东, 蒋一鸣, 漆滨汶, 等. 东海丽水凹陷古新统非典型湖

- 湘烃源岩及油气特征[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(4): 25-38.
- [16] 田兵, 李小燕, 庞国印, 等. 叠合断陷盆地沉积体系分析: 以东海丽水-椒江凹陷为例[J]. 沉积学报, 2012, 30(4): 696-705.
- [17] LI P L, HOU H B, MA H F. Tectonics and petroleum potential of the East China Sea shelf rift basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2000, 74(3): 651-659.
- [18] 葛肖虹, 马文璞, 刘俊来, 等. 对中国大陆构造格架的讨论[J]. *中国地质*, 2009, 36(5): 949-965.
- [19] 葛肖虹, 任收麦, 马立祥, 等. 青藏高原多期次隆升的环境效应[J]. *地学前缘*, 2006, 13(6): 118-130.
- [20] ISOZAKI Y. Jurassic accretion tectonics of Japan[J]. *The Island Arc*, 1997, 6(1): 25-51.
- [21] MARUYAMA S, ISOZAKI Y, KIMURA G. Paleogeographic maps of the Japanese islands: plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present[J]. *The Island Arc*, 1997, 6(1): 121-142.
- [22] 张建培, 张田, 唐贤君. 东海陆架盆地类型及其形成的动力学环境[J]. *地质学报*, 2014, 88(11): 2033-2043.
- [23] 冯晓杰, 蔡东升, 王春修, 等. 东海陆架盆地中新世代构造演化特征[J]. *中国海上油气(地质)*, 2003, 17(1): 33-37.
- [24] 赵金海. 东海中、新生代盆地成因机制和演化(上)[J]. *海洋石油*, 2004, 24(4): 6-14.
- [25] 孙晶, 杨长清, 王建强, 等. 基隆凹陷构造演化特征及油气资源潜力[J]. *海洋地质前沿*, 2017, 33(4): 38-42.
- [26] 田立新, 周东红. 渤海油田新生界火山发育区地震勘探技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2017: 242.
- [27] 王学勇, 卞保力, 刘海磊, 等. 准噶尔盆地玛湖地区二叠系风城组地震相特征及沉积相分布[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(5): 693-707.
- [28] 司学强, 陈薇, 杨志力, 等. 火山岩岩相-地震相响应关系及其应用: 以三塘湖盆地马朗凹陷哈尔加乌组为例[J]. *岩性油气藏*, 2012, 24(2): 53-60.
- [29] 付欣, 张峰, 李向阳, 等. 基于改进反射系数近似方程的纵横波阻抗同步反演[J]. *地球物理学报*, 2019, 62(1): 276-288.
- [30] FATTI J L, SMITH G C, VAIL P J. Detection of gas in sandstone reservoirs using AVO analysis: a 3-D seismic case history using the Geostack technique[J]. *Geophysics*, 1994, 59(9): 1362-1376.
- [31] 梁立锋, 刘秀娟, 但志伟, 等. 利用叠前密度反演预测岩性的应用研究[J]. *海洋石油*, 2011, 31(2): 53-58.
- [32] NALDER I A, WEIN R W. Spatial interpolation of climatic normals: test of a new method in the Canadian boreal forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 92(4): 211-225.
- [33] KIDNER D B. Higher-order interpolation of regular grid digital elevation models[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(14): 2981-2987.
- [34] MARINONI O. Improving geological models using a combined ordinary-indicator Kriging approach[J]. *Engineering Geology*, 2003, 69(1/2): 37-45.

## Prediction of lithologic distribution of basement in the Lishui Sag: a case study of the Lishui Sub-sag A

MA Qing<sup>1</sup>, QIN Jun<sup>1</sup>, XU Jingqi<sup>1</sup>, CHANG Wenqi<sup>1</sup>, ZHANG Yanhong<sup>2</sup>

(1 Shanghai Branch of CNOOC Ltd., Shanghai 200335, China; 2 Schlumberger China S.A., Beijing 100016, China)

**Abstract:** Basement is well developed in the Lishui sag, East China Sea Shelf Basin. Previous wells showed good oil and gas properties and great potential for further exploration. Using well cores, thin sections, zircon U-Pb dating, well log data, and 3D seismic data, we combined the facies-seismic model and petrophysical analysis to predict the basement facies qualitatively and semi-quantitatively and their lateral distributions. Results show that the basement of the Lishui Sag is composed of mainly gneiss, granitic gneiss, and granite. The gneiss is the Proterozoic metamorphic continental core, and the granite was the intrusive of the Mesozoic magma via deep and large faults. Seismic characteristics of gneiss show continuous bedding planes with medium-high frequency and medium-high amplitude, while granite shows chaotic reflectors with low-medium frequency and low-medium amplitude. Granitic gneiss displays seismic characteristics between these two. The petrophysical analysis indicate that the density is most effective parameter in differentiating lithologies, and pre-stack density inversion could predict better the distribution of basement rocks semi-quantitatively. It is suggested that the granite in the Lishui Sub-sag A is overlain by metamorphic rocks, and the facies in the basement top varies laterally in different tectonic units. The granite in the uplift regions has been severely eroded, and left with only gneiss and granitic gneiss basement. The places lacking deep and large faults in the sag are made up of metamorphic basement, while other areas are characterized by granitic basement.

**Key words:** Lishui Sag; basement; seismic facies; prestack inversion; lithology prediction