

# 川中充西地区雷三<sup>2</sup>亚段泥灰岩储层精细预测研究

张豪<sup>1,2</sup>, 辛勇光<sup>1,2</sup>, 马华灵<sup>3</sup>, 孙豪飞<sup>3</sup>, 朱心健<sup>1</sup>,  
谢忱<sup>3</sup>, 朱可丹<sup>1</sup>, 谷明峰<sup>1,2</sup>

1. 中国石油杭州地质研究院, 杭州 310023;
2. 中国石油勘探开发研究院 四川盆地研究中心, 成都 610041;
3. 中国石油西南油气田公司, 成都 610041

**[摘要]** 川中充西地区多口钻井在雷三<sup>2</sup>亚段泥灰岩储层中油气显示好, 测井解释储层发育, 展示了良好的勘探潜力。为准确预测雷三<sup>2</sup>亚段泥灰岩储层纵横向分布, 为下一步勘探部署提供指导, 首先利用储层合成记录标定明确储层地球物理响应特征; 接着围绕岩性和储层分别开展岩石物理分析, 优选盐岩和泥灰岩储层的敏感参数, 利用地震波形指示模拟预测盐岩的分布; 最后利用波形指示反演预测泥灰岩储层的分布。结果表明: 雷三<sup>2</sup>亚段顶部盐岩对应强波峰反射, 储层底界对应弱波峰反射, 储层与盐岩存在明显的波阻抗重叠, 而盐岩与其他岩性在密度上存在明显差异, 当去除盐岩的影响后, 利用波阻抗可以较好地地区分储层和非储层。因此, 在利用波形指示模拟识别盐岩分布后, 地震波形指示反演可有效识别储层。充西三维区储层大面积发育, 厚 30~60 m, 发育岩性圈闭 16 个, 总面积 124 km<sup>2</sup>, 是下一步富有机质泥灰岩储层的现实勘探方向。

**[关键词]** 川中地区; 雷三<sup>2</sup>亚段; 盐岩; 泥灰岩储层; 波形指示反演; 波形指示模拟

**[分类号]** P618.13

**[文献标志码]** A

## Study on the fine prediction of a marlstone reservoir in the Lei3<sup>2</sup> sub-member in Chongxi area, central Sichuan

ZHANG Hao<sup>1,2</sup>, XIN Yongguang<sup>1,2</sup>, MA Hualing<sup>3</sup>, SUN Haoifei<sup>3</sup>,  
ZHU Xinjian<sup>1</sup>, XIE Chen<sup>3</sup>, ZHU Kedan<sup>1</sup>, GU Mingfeng<sup>1,2</sup>

1. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, Hangzhou 310023, China;
2. Research Institute of Sichuan Basin, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Chengdu 610041, China;
3. PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610041, China

**[收稿日期]** 2023-03-17。

**[基金项目]** 中国石油天然气集团有限公司上游领域基础性前瞻性项目(2021DJ0503)。

**[第一作者]** 张豪(1991—), 男, 工程师, 研究方向: 地震资料解释及地球物理反演等, E-mail: zhangh\_hz@petrochina.com.cn。

**[通信作者]** 孙豪飞(1989—), 男, 工程师, 研究方向: 油气地质, E-mail: sunhaofei@petrochina.com.cn。

**[引用格式]** 张豪, 辛勇光, 马华灵, 等, 2024. 川中充西地区雷三<sup>2</sup>亚段泥灰岩储层精细预测研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(2): 247-257.

Zhang H, Xin Y G, Ma H L, et al., 2024. Study on the fine prediction of a marlstone reservoir in the Lei3<sup>2</sup> sub-member in Chongxi area, central Sichuan[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(2): 247-257.

**Abstract:** Multiple drillings in the Chongxi area of the central Sichuan Basin have revealed good oil and gas indications in the marlstone reservoir of the Lei3<sup>2</sup> sub-member. There are widely developed layers of salt rocks on top of the marlstone in the Lei3<sup>2</sup> sub-member, and the impedance of the salt rock and marlstone reservoirs are similar. Indeed, reservoir predictions are difficult to make using conventional methods due to the strong wave peak shielding effect of the salt rock. To predict the lateral and vertical distribution of the marlstone reservoir accurately, we first used synthetic logging data to calibrate and clarify the geophysical response characteristics of the marlstone reservoir. Then, we conducted a physical analysis of the rock's lithology and the reservoir, selected sensitive parameters that can identify the salt rock and marlstone reservoir, used a seismic waveform indication simulation to predict the distribution of the salt rock, and finally used waveform inversion to predict the distribution of the marlstone reservoir. The results showed that the salt layer at the top of the Lei3<sup>2</sup> sub-member corresponded to strong peak reflection, and the bottom boundary of the reservoir corresponded to weak peak reflection. There was a significant overlap of impedances between the reservoir and the salt layer, however, the density of the salt layer differed significantly from that of other lithologies. After removing the influence of the salt layer, the impedances could be used to distinguish between reservoirs and non-reservoirs. Therefore, after using the waveform indication simulation to identify the salt layer, the seismic waveform indication inversion could effectively identify reservoirs. The reservoir in the Chongxi area is extensively developed, with a thickness of 30~60 m, containing 16 developed lithological traps, and covers a total area of 124 km<sup>2</sup>, which is a realistic area for searching for new limestone reservoirs.

**Key words:** central Sichuan Basin; Lei3<sup>2</sup> sub-member; salt rock; marlstone reservoir; waveform indication inversion; waveform indication modeling

中三叠统雷口坡组是四川盆地油气勘探的重点层系,前后历经了 60 多年的勘探,主要勘探发现期是 20 世纪 70~90 年代,仅发现个别油气藏,代表性的有川西中坝构造气藏、川中磨溪构造气藏,这些油气藏以颗粒白云岩和藻白云岩为主要储集岩类型,以常规油气资源为主导,没有找到规模油气储量(王廷栋等,1989;王顺玉等,1998;李书兵等,2016;苏成鹏等,2022)。前期认为雷口坡组泥质灰岩、灰质泥岩(下称“泥灰岩”)不具备储集能力,难以形成工业油气藏(沈安江等,2008;辛勇光等,2013a,2020,2022)。通过大量研究表明,雷三<sup>2</sup> 亚段潟湖相泥灰岩即是一套优质碳酸盐岩烃源岩,也是一套有效的储层,且雷三<sup>2</sup> 亚段顶底均发育膏盐岩,已钻井压力系数较高,保存条件好,能够形成蒸发岩封盖、源储一体的非常规油气藏(孙豪飞等,2021;杨雨等,2022;张建勇等,2023)。近期川中充西地区 CT1 井在雷三<sup>2</sup> 亚段泥灰岩中测试获得高产工业凝析油气,在蒸发台地潟湖相泥灰岩储层中获得重要突破,展示了川中地区雷三<sup>2</sup> 亚段泥灰岩储层良好的勘探潜力。

通过川中地区老井复查研究,普遍油气显示较好。但受勘探程度低、研究资料较少的影响,雷三<sup>2</sup> 亚段泥灰岩勘探仍面临着有点无面的局面,泥灰岩储层预测方法缺乏前人工作借鉴,泥灰岩储层分布规律仍不清楚,制约了下一步的勘探部署。

前人围绕泥灰岩的烃源岩生烃能力、沉积环境、储层微观特征等方面开展了大量的研究工作(孙豪飞等,2021;杨雨等,2022;胡丽等,2022;张建勇等,2023),但对泥灰岩储层精细预测方面研究较少。邢福松等(2013)围绕束鹿凹陷泥灰岩储层,通过优选敏感参数,拟声波模型反演预测储层分布;曹鉴华等(2014)通过地质模型正演、基本地震属性分析、叠后波阻抗反演等处理分析技术,开展渤海湾盆地束鹿凹陷中南部沙三下亚段致密泥灰岩储层分布预测。围绕含盐岩地层的储层预测,杨淑雯等(2015)通过分析典型岩相的地震属性特征,建立研究区岩相—地震响应—地震属性的关系,膏盐岩表现为明显的强振幅、较好连续性的地震响应特征,并据此预测未钻井区域的膏盐岩分布;王伟和刘志刚(2015)基于盐岩的 4 种典

型地震反射特征,利用时间切片技术定性预测盐岩的分布特征。不同盆地不同层系泥灰岩储层特征及地震响应特征存在明显不同,研究区雷三<sup>2</sup>亚段泥灰岩储层与顶部盐岩波阻抗差异较小,且储层单层厚度较薄,直接利用传统地震属性和波阻抗反演难以进行储层精细预测。本文为准确预测川中充西地区泥灰岩储层纵横向分布,首先利用测井及岩心资料分析明确雷三<sup>2</sup>亚段地层沉积特征,接着利用岩石物理分析优选能识别盐岩和泥灰岩储层的敏感特征参数,利用地震波形指示模拟明确盐岩地层的界面,在去除顶部盐岩的影响后,最后利用波形指示反演预测泥灰岩储层的分布,研究结果与实钻井吻合较好,利用本方法可有效识别雷三<sup>2</sup>亚段泥灰岩储层,并指出下一步泥灰岩储层的有利区。

### 1 区域地质概况

中生界中三叠统雷口坡组属于扬子克拉通盆地的一部分(辛勇光等,2013b;田瀚等,2021),是四川盆地海相碳酸盐岩油气勘探的重要接替层系(张豪等,2021)。雷口坡组依据电性、岩性及沉积旋回等可以进行“五分”,即雷一段、雷二段、雷三段、雷四段和雷五段(又称“天井山组”),其中雷三段自下而上又可以细分为雷三<sup>1</sup>、雷三<sup>2</sup>和雷三<sup>3</sup>3个亚段。受印支早幕泸州—开江古隆起隆升的影响,雷口坡组在四川盆地内遭受了不同程度的剥蚀(吴小庆等,2010),大部分地区地层保存不完

整,川中地区剥蚀至雷四段,雷一段—雷三段地层保存完整。中三叠世雷口坡期,上扬子台地整体处于浅水海退背景,雷三段沉积期川中地区位于凹陷区,发育一大型潟湖,受海平面升降旋回的控制,主要发育石膏岩、盐岩与泥灰岩互层的沉积序列,沉积了多套富有机质泥质灰岩和灰质泥岩(李凌等,2012)。遂宁—南充地区为雷三<sup>2</sup>亚段凹陷中心,沉积了大套盐岩和石膏岩,为膏盐质潟湖沉积,由膏盐质潟湖沉积中心向外依次发育含膏泥灰质潟湖和泥灰质潟湖,越靠近膏盐质潟湖沉积中心,膏岩和盐岩越发育,由中心向外,膏盐岩含量逐渐降低,泥灰岩在地层中的占比逐渐增加。

本文研究区位于四川盆地中部充西三维区,构造位置属于川中古隆中斜平缓构造区。充西三维区一次覆盖面积为 420 km<sup>2</sup>,该地区前期主要以须家河组碎屑岩勘探为主,钻穿雷三<sup>2</sup>亚段的钻井只有 1 口,即 CT1 井,邻区已钻井较少,与 CT1 井相距较远,本文不作外围钻井引申。充西三维区位于雷三<sup>2</sup>亚段含膏泥灰质潟湖有利相,雷三<sup>2</sup>亚段顶部以盐岩、石膏岩与雷三<sup>3</sup>亚段灰岩、云质灰岩整合接触,底部以石膏岩与雷三<sup>1</sup>亚段灰岩、泥质灰岩整合接触。雷三<sup>2</sup>亚段根据岩性可以分为上、下 2 个部分,上部岩性主要为石膏岩和盐岩,下部岩性以泥质灰岩和灰质泥岩为主。结合研究区及邻区实钻井资料分析,研究区内雷三<sup>2</sup>亚段整体厚度比较大,厚 200~300 m 左右。通过钻井、岩心观察,结合扫描电镜等分析化验

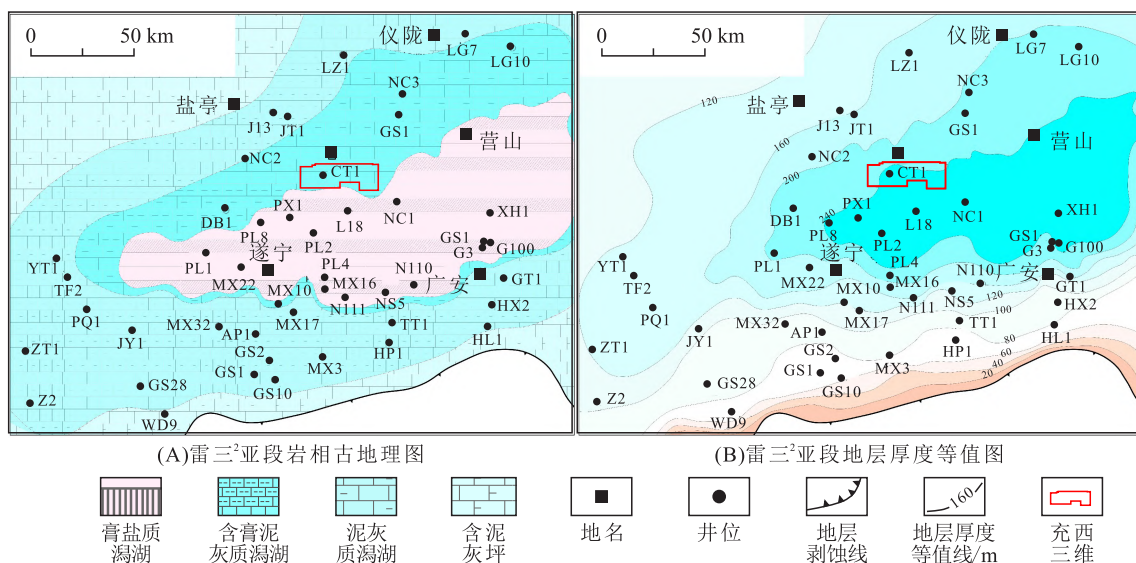


图 1 川中地区雷三<sup>2</sup>亚段沉积相图及地层厚度图

Fig. 1 Sedimentary facies map and stratum thickness map of the Lei3<sup>2</sup> sub-member in the central Sichuan Basin

手段,雷三<sup>2</sup>亚段储层岩性主要为雷三<sup>2</sup>顶部盐岩下的泥质灰岩和灰质泥岩,储集空间以纳米—微米级无机孔、有机质孔和裂缝为主,储层物性受黏土含量、石膏含量和裂缝的共同控制,孔隙度与黏土矿物含量基本呈正相关关系,含石膏时储层孔隙度也会增加,裂缝能有效改善储层渗透性,裂缝发育时储层渗透率能够实现数量级式的增加。基于川中地区多口钻井岩心和岩屑样品的物性分析,雷三<sup>2</sup>亚段泥灰岩储层孔隙度为2%~8.51%,平均孔隙度为1.74%,渗透率为(0.007 6~1.68)×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,总体表现为低孔、低渗的特征。

如图2为CT1井雷三<sup>2</sup>亚段地层综合柱状图,CT1井雷三<sup>2</sup>亚段地层厚度为308 m。测井解释泥灰岩储层厚度为55.5 m,储层岩性主要为

灰黑色泥质灰岩、深灰色含泥灰岩,局部夹黑色泥页岩,储层段在测井上表现为高自然伽马、高声波时差和高中子的特征,而石膏岩与盐岩均表现为高电阻、低伽马的特征。充西地区雷三<sup>2</sup>顶部和底部的膏盐岩可以形成良好的顶底板条件,且雷三<sup>2</sup>亚段泥灰岩是一套优质碳酸盐岩烃源岩,因此雷三<sup>2</sup>亚段能够形成源储一体、蒸发岩封盖的泥灰岩非常规油气,且埋深浅,是川中地区雷口坡组下一步重点有利勘探区。针对雷三<sup>2</sup>亚段泥灰岩储层有利区的预测,目前缺乏前人研究成果进行参考,因此本文主要针对雷三<sup>2</sup>亚段储层预测问题开展系统研究,寻找川中地区雷三<sup>2</sup>亚段泥灰岩油气现实勘探区,拓展CT1井勘探成果。

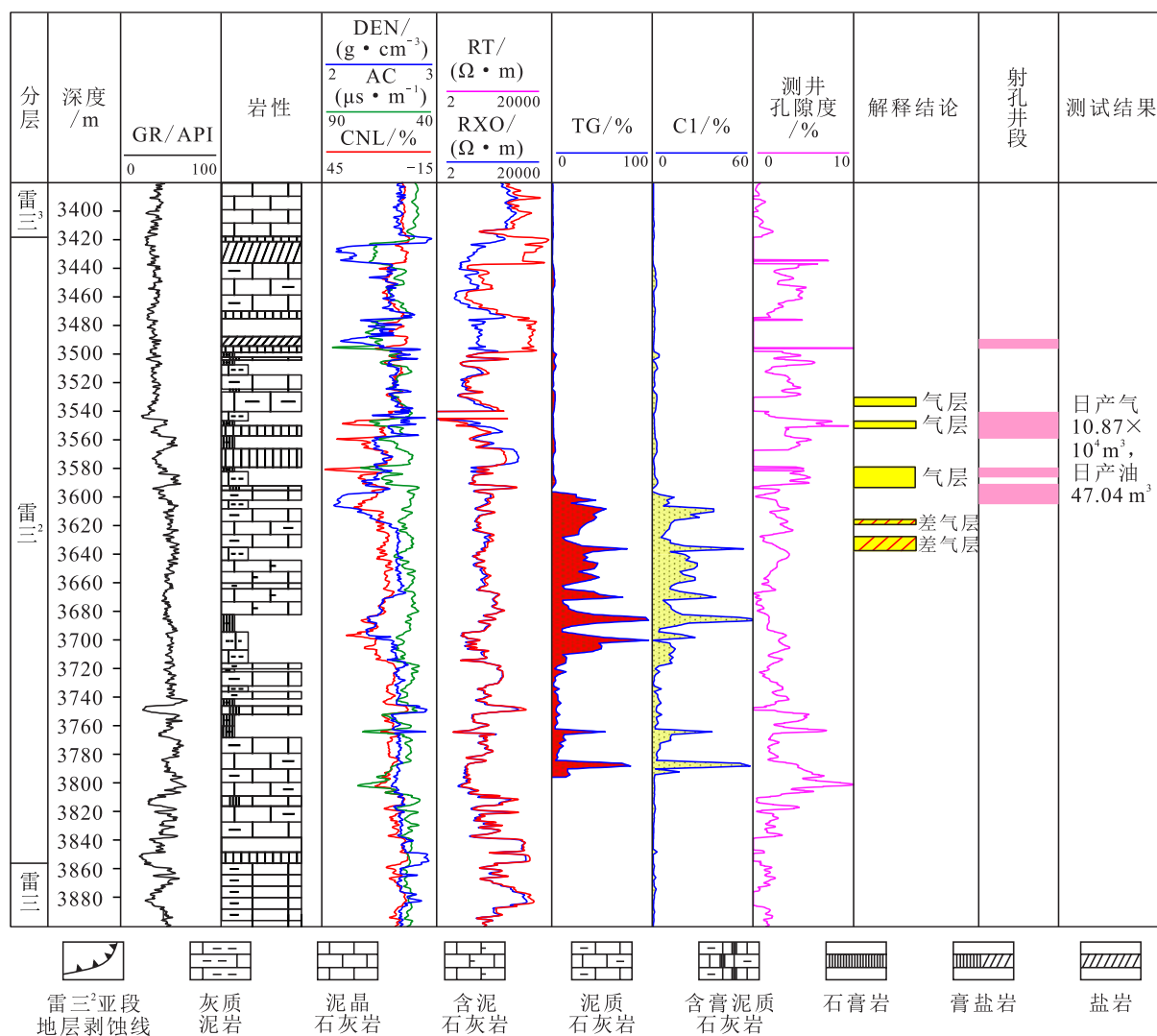


图 2 CT1 井雷三<sup>2</sup>亚段地层综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic histogram of the Lei3<sup>2</sup> sub-member of Well CT1

## 2 储层地球物理特征

### 2.1 储层地震反射特征

地震反射特征分析是认识储层特征、明确储层响应的重要一环,它可用于定性分析储层的厚度和物性,还可用于研究储层的结构特征,例如是否存在断层或裂缝,以及评估储层内流体流动的可能性。基于雷三<sup>2</sup>亚段地震频谱分析,地震主频为 30 Hz 左右,根据地震纵向分辨率的定义,地震分辨率为四分之一波长,也就是说地震只能分辨 50 m 的储层。而研究区雷三<sup>2</sup>亚段储层厚度变化较大,介于 20~60 m 不等,大部分储层厚度均低于地震分辨能力的极限。通过对研究区及邻区雷三<sup>2</sup>亚段多口实钻井进行地层划分对比和测井储层解释,定义一类储层为孔隙度大于 4%,二类储层为孔隙度介于 2%~4%,干层孔隙度小于 2%。利用精细合成记录标定,分析雷三<sup>2</sup>亚段泥灰岩储层地震响应特征。

如图 3 所示,图中蓝色区域为盐岩地层,雷三<sup>2</sup>亚段顶为灰岩与盐岩的界限,波阻抗差异较大,地震上表现为连续强波谷的反射特征,为标志反射层;雷三<sup>2</sup>亚段盐岩与下伏泥灰岩的界面也

是强波阻抗差界面,为低速地层进入高速地层的界面,表现为连续强波峰反射;雷三<sup>2</sup>亚段底界为泥灰岩夹膏岩与含泥灰岩的反射界面,表现为中弱波峰的反射。雷三<sup>2</sup>亚段泥灰岩段内部储层表现为低速、高伽马、低电阻、高中子的特征,低速的储层与高速的泥灰岩围岩形成波阻抗差,储层底界表现为弱波峰反射(图 4)。与上覆盐岩连续强波峰反射不同,储层底界波峰反射振幅能量较弱,连续性较差。此外,由于储层厚度总体较薄,储层反射易受顶部盐岩强波峰反射的屏蔽影响,储层反射为储层与泥灰岩互层时的综合响应。因此,直接基于储层反射特征开展属性提取来预测储层展布存在较大的不确定性,需要利用储层地震反演的方法来准确预测储层的展布特征。

### 2.2 储层岩石物理分析

储层岩石物理分析是利用测井资料和岩心数据,研究储层的孔隙度、渗透率、饱和度等物理参数与测井曲线之间的关系,为储层评价和地震反演提供依据。本文主要通过测井曲线的交会分析,选取能够有效识别泥灰岩储层的敏感测井参数,为基于井约束的地震反演提供指导。图 5-A 显示了纵波阻抗、密度与储层关系的散点图,其中

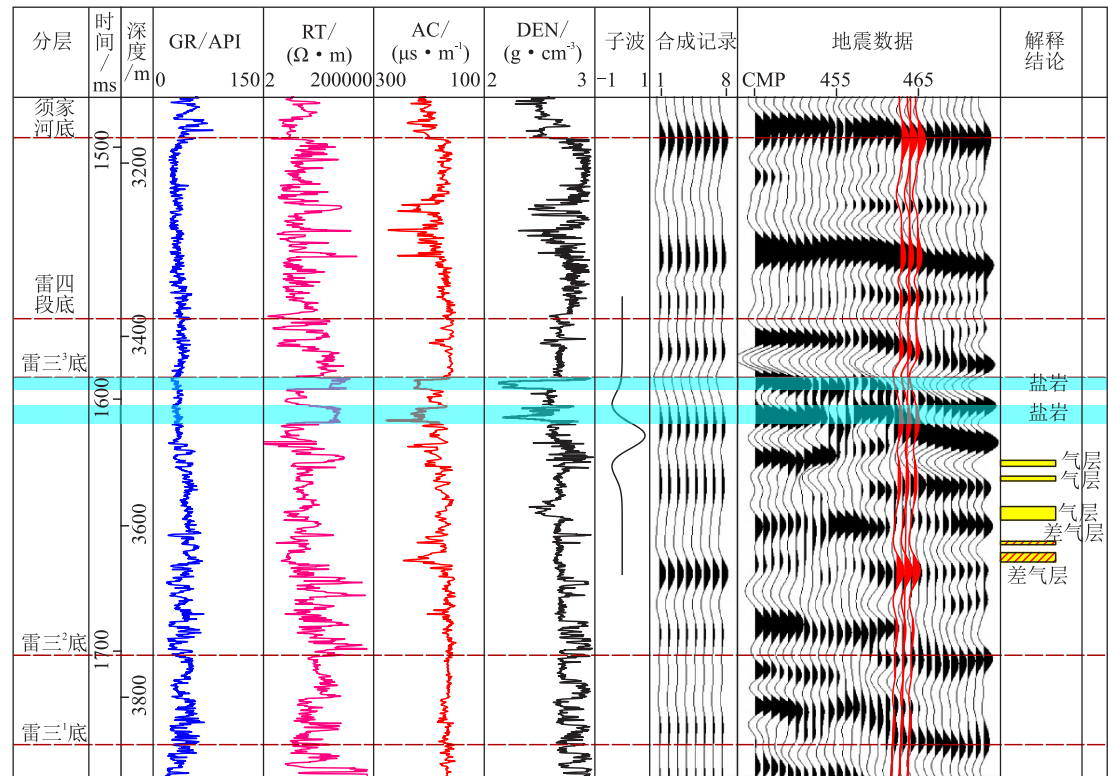


图 3 CT1 井雷三<sup>2</sup>亚段合成记录标定

Fig. 3 Calibration of synthetic records of the Lei3<sup>2</sup> sub-member from Well CT1

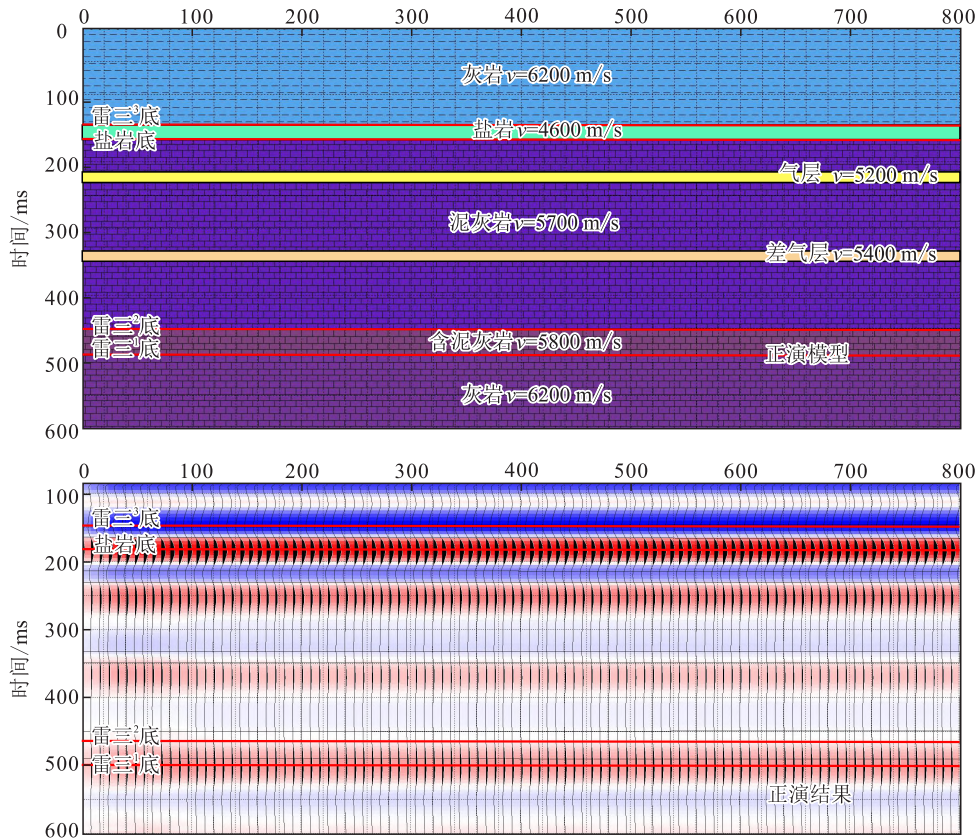


图 4 雷三² 亚段泥灰岩储层正演模型及正演结果

Fig. 4 Geological model and forward modelling result of the marlstone reservoir of the Lei3<sup>2</sup> sub-member

黄色点、红色点和蓝色点分别代表一类储层、二类储层和干层。从图中可以看出，一类储层与干层在纵波阻抗上存在明显的重叠区域，如果直接利用常规波阻抗反演技术，很难将它们区分开来。结合测井曲线与岩性交会图(图 5-B)，可以发现这些低阻抗干层的岩性主要是盐岩，而盐岩与泥灰岩在密度上有较大的差异，盐岩密度一般小于 2.5 g/cm<sup>3</sup>，而泥灰岩密度一般大于 2.5 g/cm<sup>3</sup>。因此，在去除盐岩影响后，再利用测井曲线和储层进行交会分析，可以发现储层具有低纵波阻抗和高自然伽马的特征，并且纵波阻抗对储层具有较好的识别能力，可以比较准确地区分出一类储层、二类储层和干层(图 5-C)。

### 3 泥灰岩储层预测

基于上述岩石物理分析结果，盐岩是储层反演预测的重要影响因素。盐岩具有低密度的特征，与其他岩性有明显区别。因此，我们建立了一套适用于川中地区雷三² 亚段泥灰岩储层的预测流程。首先，通过波形指示模拟密度反演识别出

盐岩地层，雷三² 亚段盐岩段主要集中在顶部，普遍发育 2 套厚层盐岩，单层厚度大于 10 m，因此通过基于波形指示模拟的密度反演能够识别盐岩地层。接着，利用波形指示密度模拟的数据，精细追踪盐岩的底界。利用追踪得到的盐岩底和雷三² 底界层位建立框架模型，约束储层反演的垂向范围，以此剔除盐岩的影响。最后，利用地震波形指示反演得到波阻抗反演数据，泥灰岩储层波阻抗小于 14 000，而干层大于该阈值，通过计算低于阈值的范围来获取泥灰岩储层的分布特征。

图 6-A 为过 CT1 井的地震剖面与波形指示模拟密度反演结果叠合图。图中暖色调代表低密度，冷色调代表高密度，分别指示盐岩段和泥灰岩段。图中井旁蓝色曲线为密度曲线，可以看到，顶部盐岩段对应低密度，与井旁曲线吻合较好。从剖面上也可以看出，盐岩底界对应波峰反射，但由于盐岩厚度横向变化较大，直接从地震剖面上难以进行追踪，而利用波形指示模拟的密度反演剖面可以进行追踪对比。利用追踪得到的盐岩底和雷三² 底界建立框架模型，约束储层波阻抗反演

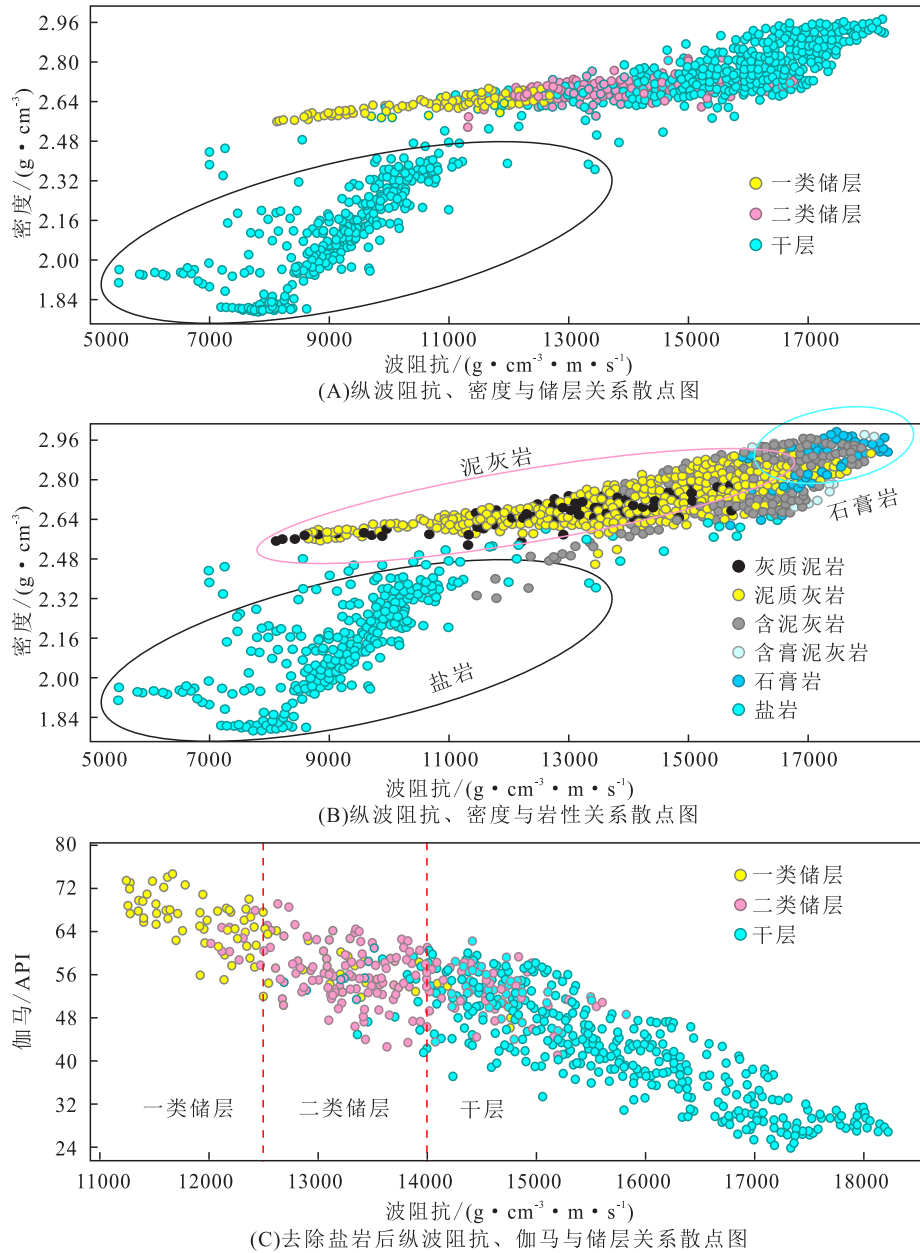


图 5 充西地区雷三<sup>2</sup>亚段储层测井参数交会图

Fig. 5 Cross-plot of reservoir logging parameters of the Lei3<sup>2</sup> sub-member in the Chongxi area

的纵向范围,剔除盐岩的影响。波阻抗反演结果如图 6-B 所示,泥灰岩储层与非储层的分界非常明显,储层纵横向展布特征清晰,储层横向上存在明显变化,局部受构造挤压的影响发生揉皱难以识别。图 6-B 中井旁粉色曲线为纵波阻抗曲线,可以看到,泥灰岩储层对应较低的纵波波阻抗,反演结果与实钻井的纵波波阻抗曲线具有很好的匹配关系。结合岩石物理分析确定的泥灰岩储层纵波波阻抗门槛值为  $14\ 000\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。统计低于门槛值的储层厚度,CT1 井雷三<sup>2</sup>亚段预测

泥灰岩储层厚度为 59 m,测井解释储层厚度为 55 m,反演结果与实钻井储层厚度的误差较小,证实地震波形指示反演对于泥灰岩储层预测的可靠性。误差主要源于测井与地震储层预测的分辨率差异,测井解释的单层储层厚度最薄为 4.5 m,远低于地震分辨率极限。由于工区钻井较少,为保证储层反演的真实性,本文不对反演结果做过多的高频估计,反演分辨率满足雷三<sup>2</sup>亚段 3 套储层的预测即可。本文也与常规宽带约束反演方法结果(图 6-C)进行了对比,可以看到利用波形指示

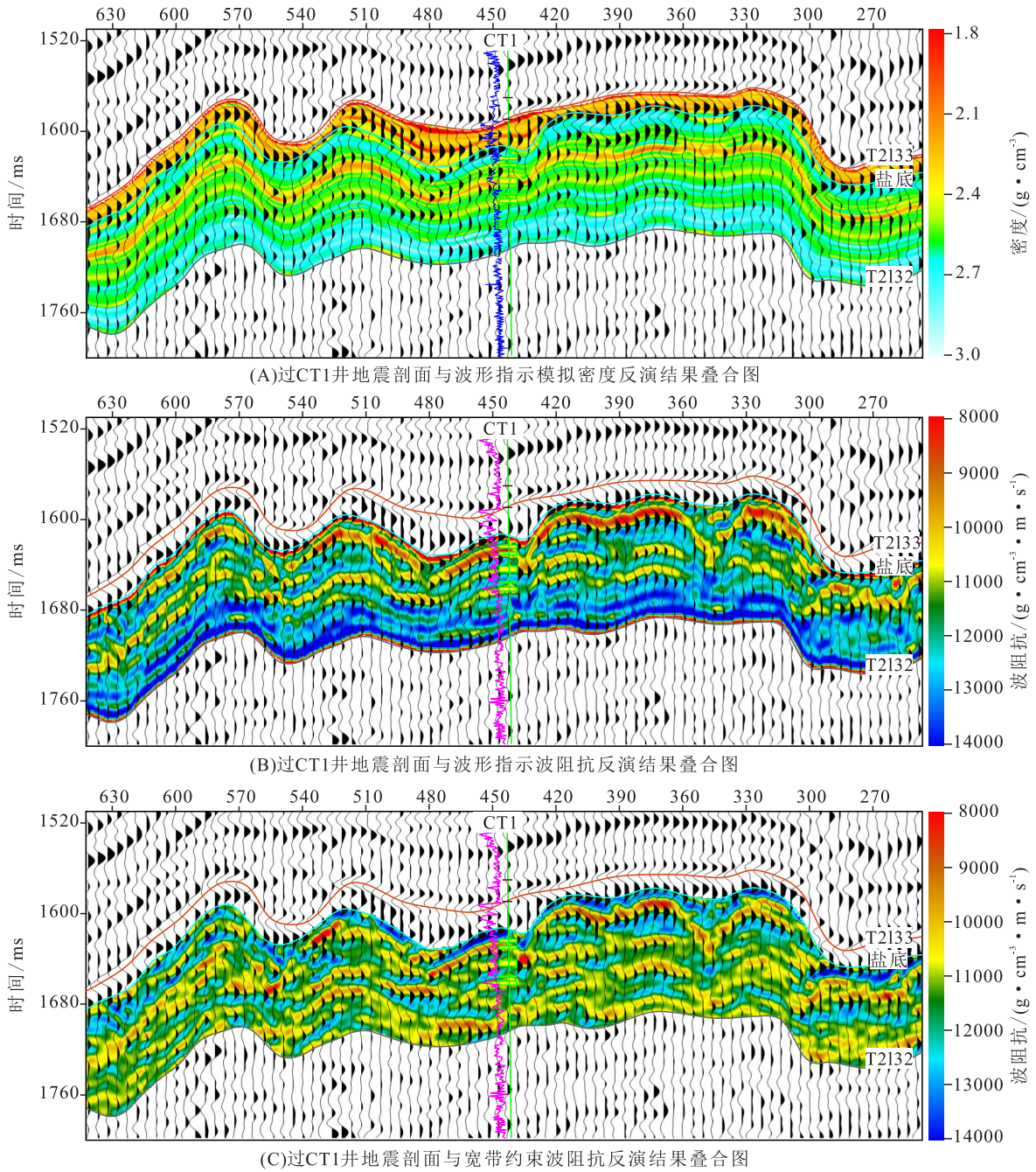
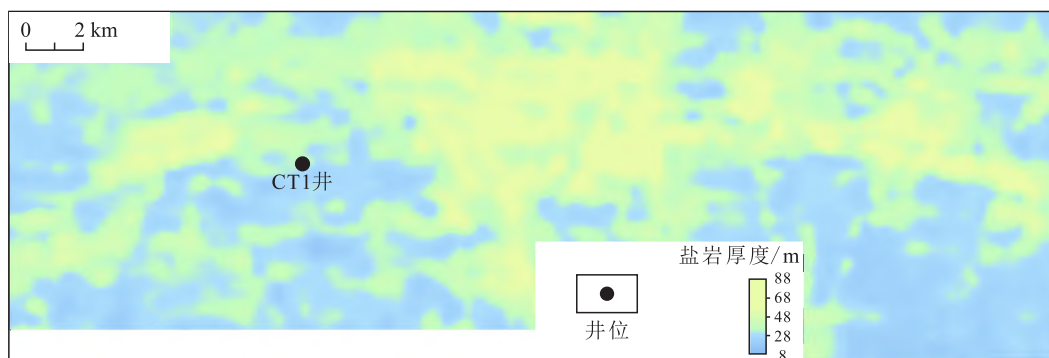
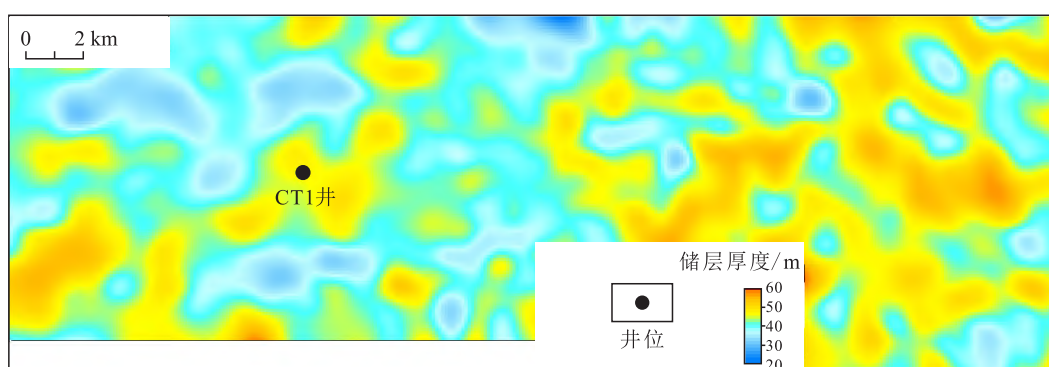
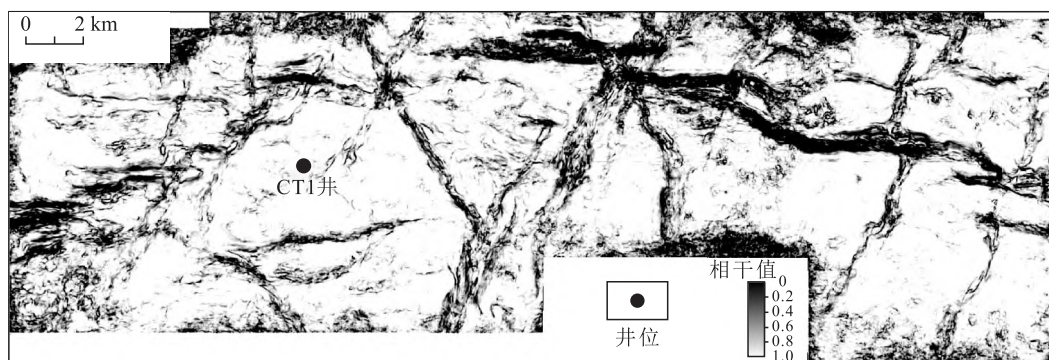


图 6 过 CT1 井地震反演剖面图  
 Fig. 6 Seismic inversion profile of Well CT1

反演得到的波阻抗反演剖面分辨率明显更高, CT1 井 3 套储层对应 3 套低阻抗, 储层横向连续性更强, 而常规宽带约束反演受雷三<sup>2</sup>底部中弱波峰的影响, 在底部反演出大套低阻抗储层, 与实钻井不吻合, 且反演分辨率较低, 难以实现储层的精细预测。

结合岩石物理分析确定的盐岩密度阈值  $2.5 \text{ g/cm}^3$ , 泥灰岩储层纵波波阻抗阈值为

$14\ 000 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 分别统计低于阈值值的盐岩厚度(图 7)和储层厚度(图 8)。从图 9(相干属性图)和图 7 可以看出, 盐岩厚度主要受断裂褶皱挤压影响, 在挤压变形强烈的区域盐岩厚度较大, 盐岩厚值区主要集中在充西三维中部, 该区域为研究区内北东向、东西向和北西向断裂围合区域。充西三维区位于膏盐质潟湖到泥灰质潟湖间的含膏泥灰质潟湖过渡相带, 盐岩厚度整体适中,

图 7 充西三维雷三<sup>2</sup>亚段地震反演盐岩厚度图Fig. 7 3D salt thickness map of the Lei3<sup>2</sup> sub-member in the Chong-xi area from seismic inversion图 8 充西三维雷三<sup>2</sup>亚段地震反演储层厚度图Fig. 8 3D reservoir thickness map of the Lei3<sup>2</sup> sub-member in the Chong-xi area from seismic inversion图 9 充西三维雷三<sup>2</sup>亚段顶界相干属性图Fig. 9 3D coherence attribute map of the top boundary of the Lei3<sup>2</sup> sub-member in the Chong-xi area

预测盐岩厚度为 40~70 m,与区域沉积相带相吻合。如图 8 为充西三维区波形指示反演预测得到的储层厚度图,雷三<sup>2</sup>亚段泥灰岩储层总体上较为发育,其厚度介于 20~60 m 之间,在平面上厚度存在一定变化,但与主干断裂间关系不明显。位于泥灰质潟湖区的 JY1 井是川中第一口针对雷三<sup>2</sup>亚段泥灰岩测试的井,JY1 井测井解释储层厚度为 28 m,

初测为  $1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ 。测试后期压力下降过快,测试结果为微气,测试效果较差的原因主要是储层以微孔微缝为主,裂缝不发育,渗透性能较差。充西地区储层以裂缝改造型为主,储层渗透性能较好,因此充西地区以储层厚度 30 m 为门槛,总面积达 210 km<sup>2</sup>,为下一步雷口坡组泥灰岩储层勘探的有利区,围绕有利区开展大斜度井或水平井

等工艺井,可以有效实现泥灰岩储层的规模效益开发。

## 4 结论

a. 雷三<sup>2</sup>亚段顶部盐岩对应强波峰反射,储层底界对应弱波峰反射,储层反射受厚度较薄和顶部盐岩强波峰的屏蔽影响,直接基于储层反射特征开展属性提取来预测储层展布存在较大的不确定性。

b. 储层与盐岩存在明显的波阻抗重叠,而盐岩与其他岩性在密度上存在明显差异,当去除盐岩的影响后,利用波阻抗可以较好地地区分储层和非储层,利用波形指示模拟可以准确识别雷三<sup>2</sup>顶部盐岩分布,在去除盐岩的基础上,地震波形指示反演可有效识别泥灰岩储层。

c. 充西三维储层大面积发育,厚 30~60 m,发育岩性圈闭 16 个,总面积 124 km<sup>2</sup>,是下一步泥灰岩储层的现实勘探方向,围绕有利区开展大斜度井或水平井等工艺井,可以有效实现泥灰岩储层的规模效益开发。

## [ 参 考 文 献 ]

- 曹鉴华,王四成,赖生华,等,2014. 渤海湾盆地束鹿凹陷中南部沙三下亚段致密泥灰岩储层分布预测[J]. 石油与天然气地质,35(4):480-485.
- Cao J H, Wang S C, Lai S H, *et al.*, 2014. Distribution prediction for tight marlstone reservoirs in lower 3<sup>rd</sup> Member of the Shahejie Formation in central and southern Shulu sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology,35(4):480-485. (in Chinese)
- 胡丽,曾丽媛,沈秋媛,等,2022. 川中—川西南地区雷三段碳酸盐烃源岩生烃评价[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),49(1):61-67.
- Hu L, Zeng L Y, Shen Q Y, *et al.*, 2022. Evaluation of hydrocarbon generation of carbonate source rocks in the third member of Leikoupo Formation in central and southwest Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 49(1):61-67. (in Chinese)
- 李凌,谭秀成,邹春,等,2012. 四川盆地雷口坡组膏盐岩成因及膏盐盆迁移演化与构造意义[J]. 地质学报,86(2):316-324.
- Li L, Tan X C, Zou C, *et al.*, 2012. Origin of the Leikoupo Formation gypsum-salt and migration evolution of the gypsum-salt pot in the Sichuan basin, and their structural significance[J]. Acta Geologica Sinica, 86(2):316-324. (in Chinese)
- 李书兵,许国明,宋晓波,等,2016. 川西龙门山前构造带彭州雷口坡组大型气田的形成条件[J]. 中国石油勘探,21(3):74-82.
- Li S B, Xu G M, Song X B, *et al.*, 2016. Forming conditions of Pengzhou large gas field of Leikoupo Formation in Longmenshan piedmont tectonic belt, western Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 21(3):74-82. (in Chinese)
- 沈安江,周进高,辛勇光,等,2008. 四川盆地雷口坡组白云岩储层类型及成因[J]. 海相油气地质,13(4):19-28.
- Shen A J, Zhou J G, Xin Y G, *et al.*, 2008. Origin of Triassic Leikoupo dolostone reservoirs in Sichuan basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 13(4):19-28. (in Chinese)
- 苏成鹏,何莹,宋晓波,等,2022. 四川盆地川西气田中三叠统雷口坡组气藏气源再认识[J]. 石油与天然气地质,43(2):341-352.
- Su C P, He Y, Song X B, *et al.*, 2022. Reinterpretation of gas sources in the Middle Triassic Leikoupo Formation in Western Sichuan gas field, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 43(2):341-352. (in Chinese)
- 孙豪飞,罗冰,文龙,等,2021. 四川盆地雷口坡组富有机质页岩的发现及盐下勘探新领域[J]. 天然气地球科学,32(2):233-247.
- Sun H F, Luo B, Wen L, *et al.*, 2021. The first discovery of organic-rich shale in Leikoupo Formation and new areas of sub salt-exploration, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 32(2):233-247. (in Chinese)
- 田瀚,王贵文,段书府,等,2021. 四川盆地中三叠统雷口坡组储层特征及勘探方向[J]. 中国石油勘探,26(5):60-73.
- Tian H, Wang G W, Duan S F, *et al.*, 2021. Reservoir characteristics and exploration target of the Middle Triassic Leikoupo Formation in Sichuan Basin [J]. China Petroleum Exploration, 26(5):60-73. (in Chinese)
- 王顺玉,戴鸿鸣,王廷栋,等,1998. 磨溪气田高成熟天然气的气源与运移[J]. 勘探家,3(2):5-8.
- Wang S Y, Dai H M, Wang T D, *et al.*, 1998. Gas source and transport of mature natural gas in Moxi Field [J]. Petroleum Explorationist, 3(2):5-8. (in Chinese)
- 王廷栋,郑永坚,李绍基,等,1989. 从油气地化特征探讨川西北中坝雷三气藏的气源[J]. 天然气工业,9(5):20-26.
- Wang T D, Zheng Y J, Li S J, *et al.*, 1989. From geochemical characteristics of oil and gas to discuss the gas source of Lei-3 reservoir, Zhongba Gas field, in

- north-west Sichuan [J]. *Natural Gas Industry*, 9(5): 20–26. (in Chinese)
- 王伟, 刘志刚, 2015. 膏盐岩预测方法及其钻遇特征分析——以渤海莱州湾凹陷为例[J]. *石化技术*, 22(6): 146–147+262.
- Wang W, Liu Z G, 2015. Analysis on gypsum rock prediction technique and its drilling characteristics[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 22(6): 146–147+262. (in Chinese)
- 吴小庆, 赵路子, 黄亮, 等, 2010. 川中—川南过渡带雷口坡组沉积相特征[J]. *四川地质学报*, 30(3): 260–264.
- Wu X Q, Zhao L Z, Huang L, *et al.*, 2010. Sedimentary facies of the Triassic Leikoupo Formation in the central-south Sichuan intermediate zone[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 30(3): 260–264. (in Chinese)
- 辛勇光, 王兴志, 唐青松, 等, 2020. 川西北地区天井山古隆起规模微生物岩储层的成因及其地质意义[J]. *天然气工业*, 40(9): 23–29.
- Xin Y G, Wang X Z, Tang Q S, *et al.*, 2020. Genesis and geological implications of large-scale microbialite reservoirs in the Tianjingshan paleouplift of the north-western Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 40(9): 23–29. (in Chinese)
- 辛勇光, 文龙, 张豪, 等, 2022. 四川盆地中三叠统雷口坡组储层特征与勘探领域探讨[J]. *中国石油勘探*, 27(4): 91–102.
- Xin Y G, Wen L, Zhang H, *et al.*, 2022. Study on reservoir characteristics and exploration field of the Middle Triassic Leikoupo Formation in Sichuan Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 27(4): 91–102. (in Chinese)
- 辛勇光, 郑兴平, 周进高, 等, 2013a. 四川盆地中西部地区中三叠统雷口坡组雷三<sup>3</sup>段储层特征及其分布[J]. *天然气工业*, 33(3): 1–5.
- Xin Y G, Zheng X P, Zhou J G, *et al.*, 2013a. Characteristics and distribution of reservoirs in the Lei-3<sup>3</sup> of the Leikoupo Formation in the western central Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 33(3): 1–5. (in Chinese)
- 辛勇光, 周进高, 倪超, 等, 2013b. 四川盆地中三叠世雷口坡期障壁型碳酸盐岩台地沉积特征及有利储集相带分布[J]. *海相油气地质*, 18(2): 1–7.
- Xin Y G, Zhou J G, Ni C, *et al.*, 2013b. Sedimentary facies features and favorable lithofacies distribution of Middle Triassic Leikoupo barriered carbonate platform in Sichuan basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 18(2): 1–7. (in Chinese)
- 邢福松, 秦凤启, 王孟华, 等, 2013. 束鹿凹陷泥灰岩致密油气藏储层预测技术研究与应用[J]. *中国石油勘探*, 18(3): 46–49.
- Xing F S, Qin F Q, Wang M H, *et al.*, 2013. Research and application of forecast technology on muddy limestone compact hydrocarbon reservoir in Shulu sag [J]. *China Petroleum Exploration*, 18(3): 46–49. (in Chinese)
- 杨淑雯, 陈波, 蔡德洋, 等, 2015. 江陵凹陷古近系新下段膏盐岩地球物理响应特征及分布预测[J]. *油气地质与采收率*, 22(2): 33–38.
- Yang S W, Chen B, Cai D Y, *et al.*, 2015. Geophysical responses characteristics and distribution prediction of gypsum-salt rock in the lower member of Xingouzui Formation of Paleogene in Jiangling sag [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 22(2): 33–38. (in Chinese)
- 杨雨, 谢继容, 张建勇, 等, 2022. 四川盆地中部中三叠统雷三<sup>2</sup>亚段非常规储层特征及勘探潜力[J]. *天然气工业*, 42(12): 12–22.
- Yang Y, Xie J R, Zhang J Y, *et al.*, 2022. Characteristics and exploration potential of unconventional Middle Triassic Lei<sub>3</sub><sup>2</sup> reservoirs in the central Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 42(12): 12–22. (in Chinese)
- 张豪, 辛勇光, 谷明峰, 等, 2021. 川西南部白马庙地区雷四<sup>3</sup>亚段薄层藻云岩预测[J]. *科学技术与工程*, 21(28): 12040–12051.
- Zhang H, Xin Y G, Gu M F, *et al.*, 2021. Prediction of thin-layer algal dolomite in Leikoupo 4<sup>3</sup> sub-member in Baimamiao area, southwestern Sichuan [J]. *Science Technology and Engineering*, 21(28): 12040–12051. (in Chinese)
- 张建勇, 辛勇光, 张豪, 等, 2023. 一种新的非常规天然气藏类型——川中地区雷三<sup>2</sup>亚段蒸发潟湖源储一体碳酸盐岩气藏[J]. *天然气地球科学*, 34(1): 23–34.
- Zhang J Y, Xin Y G, Zhang H, *et al.*, 2023. A new unconventional gas reservoir type: Source-reservoir integrated carbonate gas reservoir from evaporated lagoon facies in Lei<sub>3</sub><sup>2</sup> sub-member in Central Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 34(1): 23–34. (in Chinese)

(责任编辑: 黄维婷)