

文章编号: 0258-7106 (2014) 05-1101-07

深层富钾卤水的地球物理探测技术及应用

——以江陵凹陷为例*

黄 华^{1,2}, 刘成林³, 张士万¹, 徐海明³, 叶建中⁴, 王春连³, 彭 伟¹, 文 辉¹

(1 中国石油化工股份有限公司江汉油田分公司勘探开发研究院, 湖北 武汉 430223; 2 中国地质大学资源学院, 湖北 武汉 430074; 3 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 4 江汉油田荆州采油厂, 湖北 荆州 434020)

摘 要 上世纪在江陵凹陷的石油钻孔中发现了深层富钾卤水矿层,但是卤水矿层的空间展布一直不清。借用油气勘探领域中地球物理储层预测方法和理论,利用钻孔对矿层的垂向高分辨率的识别,标定到三维地震剖面上,利用多种地震属性横向高分辨率识别卤水矿层,预测矿层的空间分布,为靶区钻孔的部署提供依据。文章利用已经发现富钾卤水矿层的路 9 井的资料,开展模型正演,发现地震中振幅、频率、波形等属性可以较好地识别卤水矿层;将路 9 井的卤水矿层标定到地震剖面上,通过提取地震属性,识别出的富钾卤水矿层平面面积达 5.53 km²;在该富钾卤水区中部部署的岗钾 1 井,钻探获得高产富钾卤水矿层,验证了地球物理探测深层富钾卤水方法的正确性。

关键词 地球物理; 预测技术; 深层富钾卤水; 江陵凹陷

中图分类号: P631; P619.211

文献标志码: A

Application of geophysical detection method to exploration of deep potassium-rich brine formation: A case study of Jiangling Depression

HUANG Hua^{1,2}, LIU ChengLin³, ZHANG ShiWan¹, XU HaiMing³, YE JianZhong⁴, WANG ChunLian³, PENG Wei¹ and WEN Hui¹

(1 Research Institute of Exploration and Development of Jianghan Oilfield Branch Company of SINOPEC, Wuhan 430223, Hubei, China; 2 Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 3 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4 Jingzhou Production Plant of Jianghan Oilfield Branch Company of SINOPEC, Jingzhou 434020, Hubei, China)

Abstract

Large quantities of deep potassium-rich brine seams were found in the petroleum drill holes in the Jiangling Depression in the last century; nevertheless, spatial distribution of the brine deposits remain unknown. On the basis of geophysical methods and theories used in reservoir prediction of hydrocarbon exploration, spatial distribution of the brine deposits can be predicted by identifying brine seams utilizing high lateral resolution of multiple seismic attributes which have been calibrated in 3-D seismic profile by diagnosing high vertical resolution of the brine deposits using drilling holes, so as to provide the basis for drilling brine wells in the target area. Using data from Well Lu-9 in which potassium-rich brine seams had been found, the authors performed forward modeling in this study. It is shown that the brine seams can be identified utilizing such seismic attributes as amplitude,

* 本文得到国家“863”计划项目课题(2012AA061701)、国家 973 计划项目课题(2011CB403007)、地质调查项目(1212010011808)及锦辉集团科技项目的联合资助

第一作者简介 黄 华,男,1982 年生,高级工程师,从事矿产资源地质勘探与开发研究。Email: 876813589@qq.com

收稿日期 2014-05-10; 改回日期 2014-8-20。张绮玲编辑。

frequency, and wave pattern, that through calibrating the brine seams of Well Lu-9 in a seismic profile, the identified brine seams exhibit an planar area of 5.53 km² based on extraction of seismic attributes, and that the geophysical method could be correctly verified for investigation of deep potassium-rich brines by encountering productive potassium-rich brine seams in Well Gangjia-1 which was drilled in the middle part of an identified potassium-rich brine area.

Key words: geophysics, forecasting techniques, deep potassium-rich brine, Jiangling Depression

钾盐是中国紧缺的重要战略资源之一,目前中国钾盐资源类型基本分为三大类,即第四纪盐湖钾盐、前第四纪固体钾盐和深层富钾卤水。第四纪盐湖钾盐资源已基本查清,主要分布于青海柴达木盆地(朱允铸等,1990)和新疆罗布泊(王弭力等,2001;刘成林等,2007;2010),并成为中国生产钾盐的主要来源;对前第四纪固体钾盐资源,已发现中小型矿床(张嘉澍等,1980),并进行了小规模开发;而深层富钾卤水资源则大多处于勘探评价阶段,由于其资源分布广,并伴生有锂、硼、溴、碘、铷、铯等重要资源(林耀庭等,1996;刘成林,2013),故成为下一步钾盐矿产勘探开发的重要类型。深层富钾卤水具有埋藏深、压力大、钻探成本高、开采难度大等特点,加之埋藏规律短期内难以完全查清,孔位部署难度大,给富钾卤水勘探开发带来了极大的技术与环境风险。由于石油矿产和富钾卤水矿产均属于埋藏于地下的流体矿产,流体性质和开采方式较为相似,因此,利用石油勘探中积累的基础资料及勘探技术方法来寻找富钾卤水层,可以较为准确的设计孔位,降低勘探风险。

地球物理储层预测是利用地震资料进行储层岩性、形态、物性和流体性质的预测,目前主要为油气勘探开发中具体钻孔部署、确定勘探开发方案提供依据。自20世纪90年代以来,储层地球物理预测技术基本成熟,形成了以地震反演、地震属性分析、AVO分析等为技术主体的一整套储层地震预测技术系列,在油气勘探开发中发挥着重要作用,成为了油气勘探开发的主导技术(赵政璋等,2005)。由于深层的富钾卤水和石油矿产一样,属于流体矿产,具有很多类似的性质,因此,可以用地球物理储层预测方法开展富钾卤水矿层的预测,为孔位部署提供依据。2011年1月,中国地质科学院矿产资源研究所联合江汉油田分公司勘探开发研究院等单位,利用地球物理探测技术预测江陵凹陷南岗地区的富钾卤水矿层平面分布,在预测区中部署“岗钾1井”,并

在3581.40 m处成功钻遇高温高压卤水层,日产卤水达4320 m³, $w(\text{KCl})$ 为1.64%(刘成林,2013)。本文基于上述勘探成果,孔位部署中利用了地球物理技术方法,以期为类似的深层富钾卤水勘探提供借鉴。目前利用地球物理方法预测深层卤水的报道仅见于四川盆地海相卤水中的初步应用(阎建国等,2013),在其他地区还未见有相关应用。笔者认为,随着深层卤水资源勘探开发力度的加大,深层卤水地球物理探测技术将被广泛应用,成为深层卤水勘探开发的常规技术。

1 江陵凹陷富钾卤水产层特征

江汉盆地内的江陵凹陷是在白垩纪基底上发育起来的白垩纪—第三纪内陆盐湖沉积凹陷(卢明国等,2007;王春连等,2012;2013;黄华等,2011),面积6500 km²,是江汉盆地最大的次级负向构造单元。凹陷内自下而上分别发育有白垩系,古近系的沙市组、新沟嘴组、荆沙组、潜江组、荆河镇组,新近系广华寺组及第四系,以碎屑岩沉积为主。沙市组、新沟嘴组下段发育有含盐层系(陈波等,2007)。

上世纪六七十年代,在江陵凹陷钻探的石油钻孔中发现了大量的卤水层,以沙4、沙15及路9井为例,卤水主要产自古新统沙市组和始新统新沟嘴组。卤水中主要富含钾,另外锂、硼、溴、碘、铷、铯等含量也较高,卤水品位高(表1)。卤水矿层有火成岩和泥岩等,产量较高,属于高压自喷孔隙-裂缝类型的卤水层。江陵凹陷深层富钾卤水形成于陆相古盐湖,明显区别于四川盆地的海相盐湖形成的富钾卤水(徐国盛等,2012)。江陵凹陷作为典型的陆相古盐湖富钾卤水区,被选为本次的研究区,江陵凹陷的南岗地区被三维地震资料覆盖,地震资料品质较好,满足地球物理探测富钾卤水矿层的需要,且该区路9井中发现了高压富钾卤水矿层,因此以南岗地区作为研究对象。

表 1 江陵凹陷地层水微量元素分析表
Table 1 Trace element analyses of formation water in the Jiangling Depression

孔位	卤水矿层			$\rho(B)/\text{mg/L}$													
	层位	岩性	产量/ m^3/d	K ⁺	Ca ²⁺	Rb ⁺	Cs ⁺	Sr ²⁺	Na ⁺	Li ⁺	B ³⁺	Mg ²⁺	I ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Br ⁻	总矿化度
沙 15	沙市组	火成岩	246	9173	5422				120714				39	203259	483	220	310425
沙 4	沙市组	火成岩	1500	9053	16400	56	17	18	103660	65	26	3	42	198800		230	330591
路 9	新沟嘴组	泥岩	16530	9625	4430	74	27	400	116720	62		8	32	195672	996	232	327724

注：元素分析由江汉油田分公司勘探开发研究院测试中心完成。

表 2 主要地震属性参数意义表
Table 2 Parameter meaning of major seismic attributes

序号	属性参数	参数特征及地质意义	应用计算公式	符号说明
1	振幅	反映反射波强弱。用于地层岩性相变分析，计算薄砂层厚度，识别亮点、暗点，识别火成岩等特殊岩性	A	A ：振幅值
2	均方根振幅	对特别大的振幅非常敏感，其余基本上同	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2}$	a ：瞬时振幅值
3	波形相关分析	利用波形特征反映各类沉积储层的发育特征，不同的岩性组合模式有不同的地震波形特征	形状变化	
4	瞬时频率	用于低频带的识别；确定沉积厚度；显示尖灭、边界突变现象	$\frac{d\theta(t)}{dt}$	$\theta(t)$ ：瞬时相位
5	瞬时相位	进行地震地层层序和特征的识别，识别断层、尖灭、河道	$\tan^{-1} \frac{h(t)}{f(t)}$	$h(t)$ ：正交道相位 $f(t)$ ：常规地震道相位

2 富钾卤水层地球物理预测原理与方法

目前储层地球物理预测已成为中国陆上油气勘探的一项常规手段，它是通过分析地震波的速度、振幅、相位、频率、波形等参数的变化来预测储层的分布范围、储集特征等(赵政璋等,2005)。岩性、储层物性和充填的孔隙流体性质的空间变化，造成了地震反射波速度、振幅、相位、频率、波形等的相应变化，这些变化是地球物理储层预测的主要依据(表 2)。

富钾卤水与石油一样都是以流体的形式赋存在地下岩石中。岩石中含有流体之后，会与不含流体的岩石反映出不同的地球物理性质。当进行人工地震采集时，岩石物理特性就表征到地震资料中，再利用地震资料提取出反映岩石物理特性的属性，就可以预测卤水矿层。在厘清富钾卤水分布规律的基础上，充分利用已发现的富钾卤水矿点开展地球物理卤水层的预测，以明确矿体空间上的分布范围，这对于减少富钾卤水层勘探的盲目性、提高钻探成功率具有重要意义。

3 应用实例

在江陵凹陷的南岗地区开展了地球物理预测深层富钾卤水的工作，并在预测的富钾卤水区中部署

了钻孔——岗钾 1 井，获得卤水勘探的成功。

3.1 地震资料

本次研究采用的地震资料是南岗地区三维资料，资料处理类型是叠后时间偏移，面元大小 25 m×50 m。目的层段主频为 35 Hz，频带宽度为 20~70 Hz，Ⅰ类资料品质大于 70%，待预测区均位于Ⅰ类资料品质范围内，故地震资料支持开展地球物理储层预测。

3.2 地震地质模型正演

南岗构造带中路 9 井钻遇到高压富钾卤水层发生井喷，未得到测井资料，故借用其旁边 ES22 井的测井资料。结合路 9 井岩性、井喷(试水)和鄂深 22 井测井资料，可以划分出卤水层和干层(图 1)。路 9 井井段 3551~3565.4 m 在钻井中发生富钾卤水井喷，折算产量 16 530 方/天，岩性为粉砂岩和泥岩，可以作为卤水层。卤水层周缘的 3528.8~3531.4 m、3536.0~3538.4 m、3541.6~3546.4 m、3566.0~3567.8 m 等井段，岩性为粉砂岩，钻进过程中无富钾卤水显示，虽未进行试水，但其密度大、声波时差小，反映其孔隙度小，可以作为干层。其他的地层以泥岩为主，可以作为围岩。结合试水情况和测井解释情况(表 3)，可以发现卤水层在测井上主要以低密度、高声波时差为主，反映其物性好，电阻率为低值，反映其为卤水性质；干层物性则以低伽马、高密度、低声波时差、高电阻率的砂岩为主要特点；围岩物性

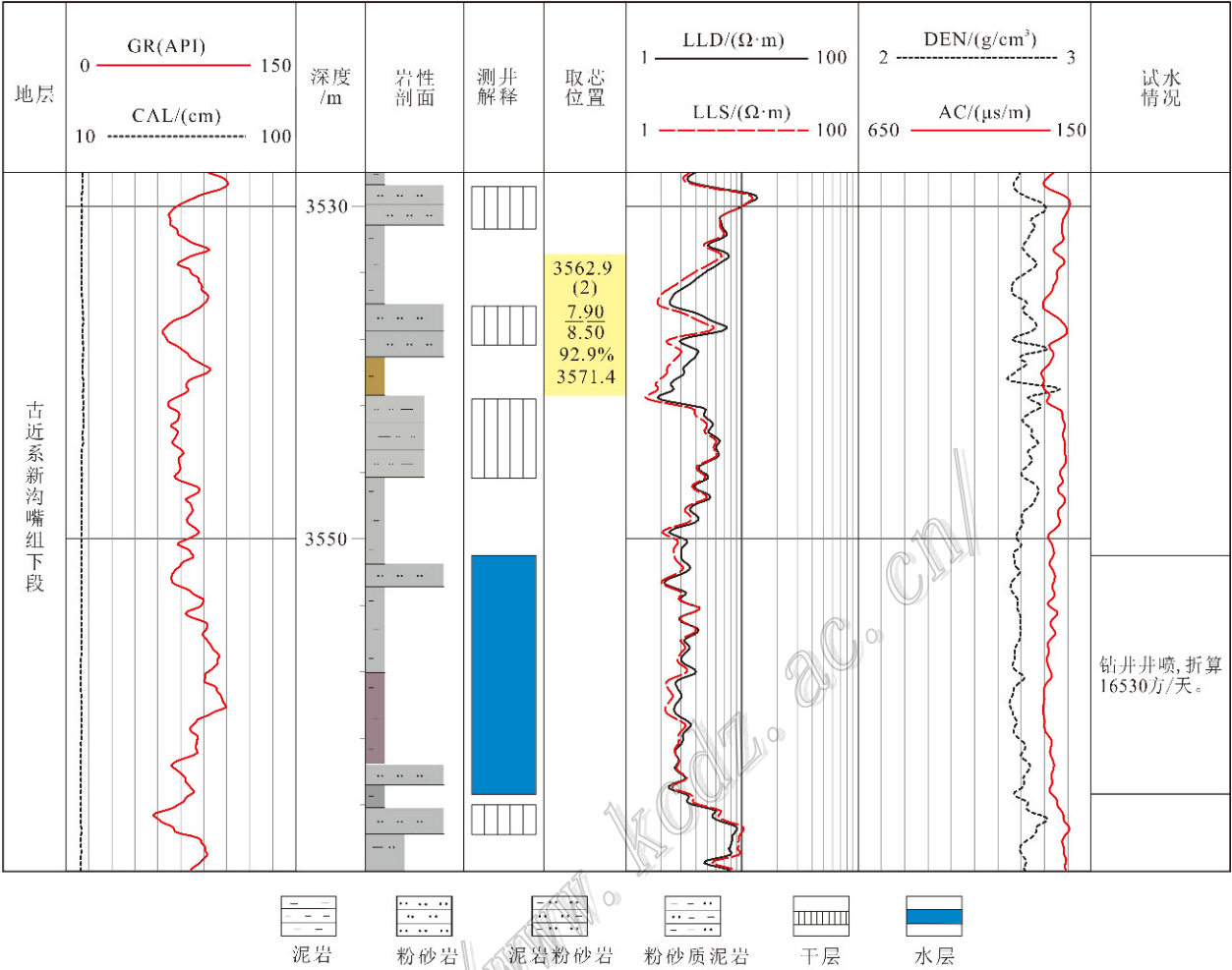


图 1 南岗地区卤水层综合柱状图(资料来源于 ES22、路 9 井)

Fig.1 Generalized column section for brine layer in the Nanggang area (data from wells ES-22 and Lu-9)

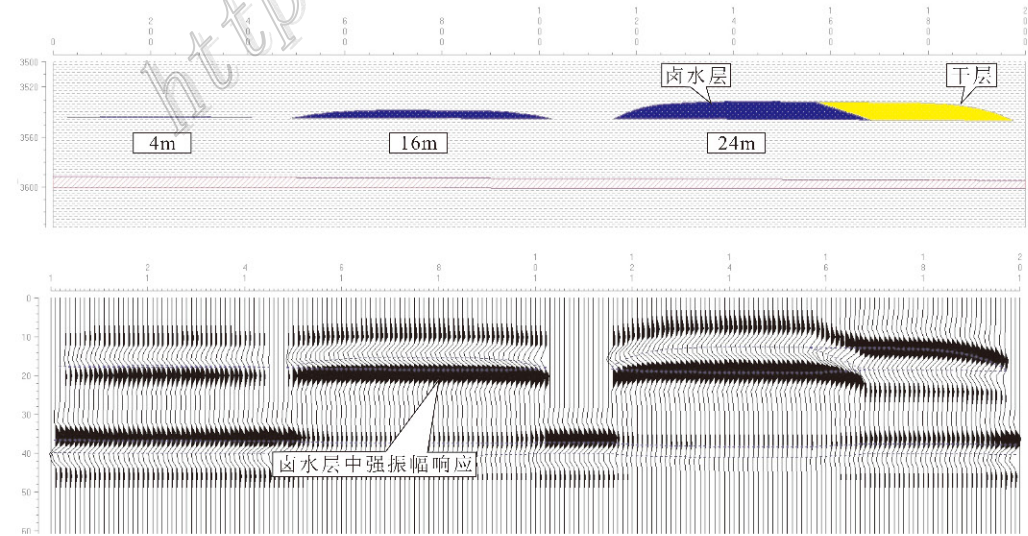


图 2 南岗地区二维正演模型地质、地震对比剖面图

Fig. 2 Geological and seismic section comparison of 2D seismic forward modeling in the Nanggang area

表 3 南岗地区卤水层、干层和围岩特征统计表

Table 3 Statistics for characteristics of brine layer, dry layer and surrounding rock in the Nangang area

地层	岩性	测井特征				产量情况	钻井情况
		伽马/API	电阻率/ $\Omega \cdot m$	密度/ (g/cm^3)	声波时差/ $(\mu s/m)$		
卤水层	粉砂岩、泥岩	68~104	1~3(低电阻率)	2.64~2.70 (低密度)	223~253 (高声波时差)	产量高	卤水溢流、井喷
干层	粉砂岩	62~70 (低伽马)	6~13 (高电阻率)	2.70~2.80 (高密度)	200~207 (低声波时差)	无产量或产量低	无异常
围岩	泥岩	80~105 (高伽马)	3~7	2.65~2.77 (中密度)	220~200 (低声波时差)	无产量	无异常

是高伽马、中密度、低声波时差的泥岩为主要特征。

通过南岗地区卤水层、干层、围岩的物性特点，建立了合理的二维正演模型(图 2)。蓝色条带代表不同厚度的卤水层(取密度 $\rho = 2.65 \text{ g/cm}^3$ ，声波时差 $AC = 230 \text{ } \mu\text{s/m}$ ，计算得到速度 $v = 4347 \text{ m/s}$)，自左向右增厚，黄色条带代表干层(取密度 $\rho = 2.75 \text{ g/cm}^3$ ，声波时差 $AC = 205 \text{ } \mu\text{s/m}$ ，计算得到速度 $v = 4878 \text{ m/s}$)，围岩以泥岩($\rho = 2.70 \text{ g/cm}^3$ ，声波时差 $AC = 210 \text{ } \mu\text{s/m}$ ，计算得到速度 $v = 4762 \text{ m/s}$)为主。通过对地质模型和正演模型的对比可以看出，卤水层在地震剖面上能形成明显中强振幅的反射特征，其振幅强弱随卤水层厚度呈正相关变化，厚度增大，振幅增强。在卤水层与干层过渡区，同相轴尖灭且有下拉现象，波形特征和相位变化明显。根据以上分析，认为一定厚度的卤水层可引起地震振幅、波形和相位等参数的变化，因此这些地震属性可作为卤水层的地震储层预测敏感参数，通过反演这些敏感地震属性，可以识别出卤水层。

3.3 构造特征

南岗地区是一个北北东向展布的、在荆沙期被李埠断层切割所形成的鼻状构造，构造的形成与荆沙组中期的构造反转有关。荆沙组中期，江陵凹陷经历了挤压、抬升、剥蚀作用，促使沙市组厚层盐岩发生塑性流动，在南岗地区形成盐枕构造，南岗鼻状构造带就此形成(图 3)。从区域应力分析来看，该地区地层受到水平方向挤压应力和垂直方向盐隆挤压应力的双重影响，构造高部位和北西轴向是挤压应力集中释放带，裂缝十分发育。路 9 井位于该鼻状构造轴向上，在新沟嘴组下段Ⅲ油组钻遇高温高压富钾卤水层，储层是粉砂岩与泥岩互层的孔隙-裂缝型储层。因此，推测在相同构造背景下的鼻状构造的轴部还存在类似的高温高压卤水层，富钾卤水找

矿潜力大(黄华等,2011)。

3.4 卤水层的标定及追踪

层位标定是将钻孔、测井等资料与地震剖面建立起对应关系或联系，是架起井震之间关系的桥梁，目的是分析地震剖面上反射同相轴形成的原因，明确反射同相轴的地质含义。通过该区钻井合成记录，将路 9 井的卤水层标定在地震时间剖面上(图 4)。从标定情况看，卤水井喷层位于强反射轴的波峰上，剖面特征明显，具有强振幅、高连续的反射特征，反射品质较好，可连续对比追踪。从南岗地区追踪情况看，该反射轴波形特征存在明显变化，在部分地区由高频、强反射轴转变为低频、断续反射相位。从上述二维模型正演结论看出，当地震同相轴的振幅、波形和相位出现变化时，反映岩石中流体性质或者岩性出现变化，因此可以认为路 9 井卤水层标定的波阻是富钾卤水的反射，与之连续的相同的波阻也是富钾卤水层的反射；而当波阻反射发生变化，被认为是富钾卤水层的中断，表明了矿体横向的结束。

3.5 多地球物理属性对卤水层的预测

为了确定卤水层的平面分布范围，利用南岗三维地震资料开展了预测工作。在层位追踪的基础上，开展了不同类型的属性预测，包括振幅、顺层切片振幅、频率(65 Hz)、波形相关、均方根等多种属性。通过对比不同属性在路 9 井的富钾卤水层的符合度，优选顺层切片振幅属性、波形相关属性、65 Hz 频率属性进行富钾卤水层平面分布范围的预测(图 5)。综合各类属性，勾绘出富钾卤水矿层平面分布范围 5.53 km^2 ，总体呈现 NNE 向，埋深在 $3400 \sim 4000 \text{ m}$ (图 6)。

根据卤水层预测结果，在南岗地区部署“岗钾 1 井”，钻探后发现高温高压富钾卤水层，日产卤水达 4320 m^3 ， $w(\text{KCl})$ 为 1.64%，获得富钾卤水勘探的成功。

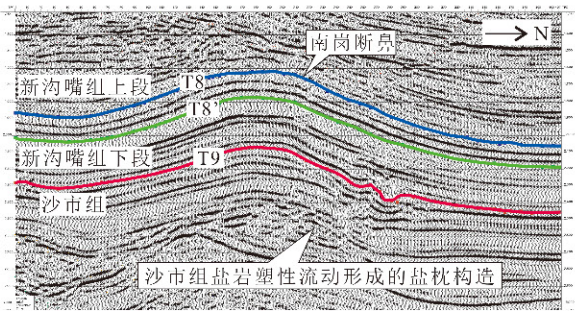


图 3 南岗三维地震地质解释剖面图(南北向)
Fig. 3 Seismic and geological interpretation of 3D line in Nangang(in S-N direction)

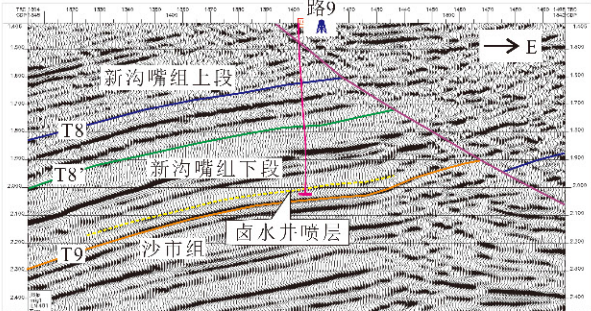


图 4 过路 9 井层位标定地震剖面图(东西向)
Fig. 4 Seismic profile of section calibration across Lu9 well(in E-W direction)

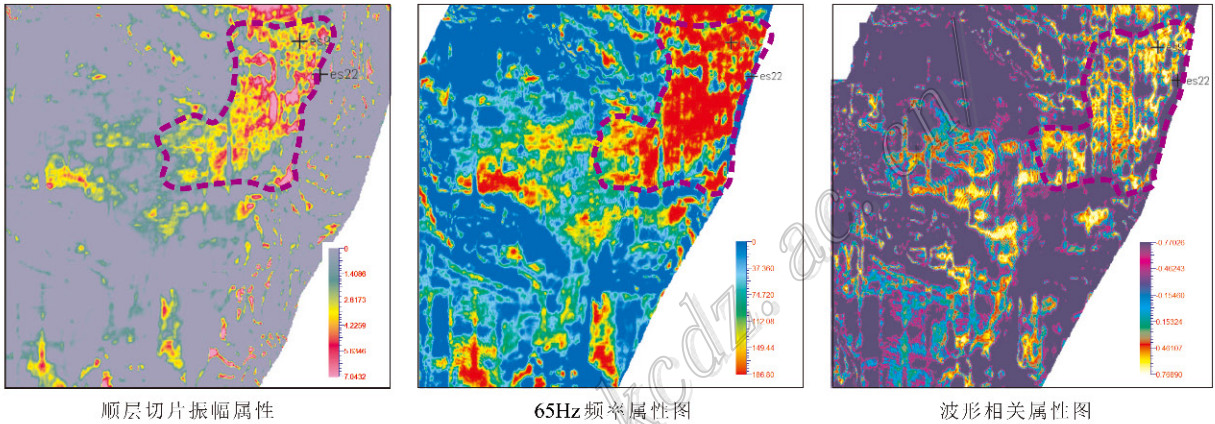


图 5 南岗三维路 9 井区卤水层段储层预测图
图中圈出的为不同属性预测的富钾卤水分布区
Fig. 5 Reservoir prediction of brine formation of 3D Lu9 well in Nangang

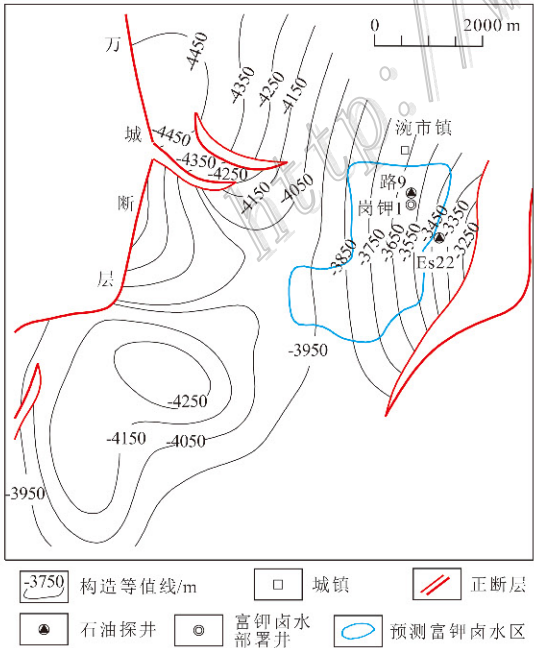


图 6 南岗地区富钾卤水层平面分布范围预测图
Fig. 6 Predicted plane distribution map of potassium-rich brine formation in the Nangang area

4 结 论

(1) 通过模型正演发现富钾卤水矿层在平面变化时(厚度变化、岩性体变化、矿层尖灭)可引起地震反射波的变化,表现为地震的振幅、波形和相位等参数的变化,因此提取地震属性可以预测富钾卤水矿层的平面展布特征。

(2) 通过已有钻孔对富钾卤水层进行精细标定,沿层提取各种属性,优选利用顺层切片振幅、波形相关、65 Hz 频率等属性,预测南岗地区的古近系新沟嘴组下段的富钾卤水矿层的平面分布形态,部署岗钾 1 井进行勘探,获得富钾卤水。

(3) 不同储集体类型的富钾卤水分布特征不同,应选取不同类型的地球物理方法和不同的敏感参数进行预测,建议加强卤水成因规律及储层沉积特征研究,从宏观上明确卤水层分布范围,对储层预测结果进行校正,提高勘探成功率。

志 谢 长江大学陈波教授对本文给予很多宝贵修改意见,江汉油田分公司勘探开发研究院李春燕工程师对部分图件进行了修改编辑,在此一并表示谢意。

参考文献/References

- 陈 波,肖秋荷,曹卫生,赵海涛. 2007. 江汉盆地潜江组与沙市组盐间非砂岩油气藏勘探潜力对比[J]. 石油勘探与开发, 34(2): 190-196.
- 黄 华,刘亚伟,彭 伟. 2011. 江陵古近纪盐盆地富钾卤水[R]. 内部报告. 武汉:江汉油田分公司勘探开发研究院.
- 林耀庭,颜仰基,吴应林. 1996. 四川盆地某地富矿卤水水文地球化学特征及其成因资源意义[J]. 岩相古地理, 16(4): 12-22.
- 刘成林,焦鹏程,王弭力,陈永志. 2007. 罗布泊盐湖巨量钙芒硝沉积及其成钾效应分析[J]. 矿床地质, 26(3): 322-329.
- 刘成林,焦鹏程,王弭力. 2010. 盆地钾盐找矿模型探讨[J]. 矿床地质, 29(4): 581-592.
- 刘成林. 2013. 大陆裂谷盆地钾盐矿床特征与成矿作用[J]. 地球学报, 34(5): 515-527.
- 卢明国,陈凤玲,刘 俊. 2007. 江汉盐湖盆地沉积特征[J]. 中国矿业, 16(4): 102-104.
- 王春连,刘成林,胡海兵,毛劲松,沈立建,赵海彤. 2012. 江汉盆地江陵凹陷南缘古新统沙市组四段含盐岩系沉积特征及其沉积环境意义[J]. 古地理学报, 14(2): 165-175.
- 王春连,刘成林,徐海明,王立成,张林兵. 2013. 江陵凹陷古新世盐湖沉积碳酸盐碳氧同位素组成及其环境意义[J]. 地球学报, 34(5): 567-576.
- 王弭力,刘成林,焦鹏程,韩蔚田,宋松山,陈永志,杨智琛,樊卫东,李廷祺,李长华,冯金星,陈建忠,王新民,于志鸿,李亚文. 2001. 罗布泊盐湖钾盐资源[M]. 北京:地质出版社.
- 徐国盛,陈美玲,刘 为,孟昱璋,杨 朋,胡永宏,彭敬成,王宪刚,黄小琼. 2012. 川西地区雷口坡组岩相古地理与富钾卤水预测[J]. 矿床地质, 31(2): 309-322.
- 阎建国,侯 磊,赵玉红,杨晓玉. 2013. 地震勘探方法在川东深层富钾卤水勘探中的应用[J]. 中国工程科学, 15(10): 59-65.
- 张嘉澍,李官贤. 1980. 云南江城勐野井钾盐矿床地质特征[A]. 见:云南省地质局钾盐地质科学研究队编. 云南思茅地区钾盐地质研究论文集[C]. 38-44.
- 赵政璋,赵贤正,王英民. 2005. 储层地震预测理论与实践[M]. 北京:科学出版社. 1-423.
- 朱允铸,钟坚华,吴必豪,刘成林. 1990. 阿尔金山上升史与塔里木、柴达木成盐关系初探[J]. 石油与天然气地质, 11(2): 136-143.