

应用核磁共振技术分析干盐湖地区地下卤水空间分布特征——以昆特依干盐湖为例*

杨修猛^{1,2,3}, 刘文玉^{1,2,3}, 韩凤清^{1,2**}, 韩继龙^{1,2,3}, Hussain Syed Asim^{1,2,3}, 年秀清^{1,2,3}, 毛庆飞^{1,2,3}, 严维德⁴

(1: 中国科学院青海盐湖研究所青海省盐湖地质与环境重点实验室, 西宁 810008)

(2: 中国科学院盐湖资源综合高效利用重点实验室, 西宁 810008)

(3: 中国科学院大学, 北京 100049)

(4: 青海省水文地质工程地质环境地质调查院, 青海省水文地质及地热地质重点实验室, 西宁 810008)

摘要: 昆特依干盐湖位于柴达木盆地西北部, 为特大型综合盐类矿床。大盐滩是昆特依干盐湖内最大的盐滩, 地下赋存一定量的卤水矿床, 但该矿床的水文地质条件差, 主要卤水矿层含水性弱, 开采难度大。核磁共振找水方法作为当今世界上唯一的直接找水地球物理新方法, 具有高分辨力、高效率、信息量丰富和解的唯一性等优点, 本文运用该方法对昆特依干盐滩地区地下卤水空间分布特征进行研究, 通过对核磁共振数据进行处理与反演, 结合已有的地质与钻井资料, 对测点进行综合地质—地球物理解释, 获得以下认识: 1) 大盐滩 0 ~ 130 m 深度范围内, 共存在 3 个卤水含水层, 主要呈扁平状或漏斗状、近似层状展布, W_1 为晶间潜卤水层, 渗透系数较大, 颗粒较粗, 单位体积含水量为 0.4% ~ 2.7%, W_2 和 W_3 为晶间承压卤水层, 渗透系数较小, 颗粒较粗, 单位体积含水量分别为 0.2% ~ 1.1% 和 0.1% ~ 0.8%; 2) 大盐滩地区存在两个卤水富集区, 分别为研究区西南部沉积盆地中心的 I 号富卤区和盆地东北部的 II 号富卤区; 3) 根据区域内卤水富集分布以及构造情况, 划定大盐滩向斜沉积中心、大盐滩北侧 F1 ~ F8 及 F6 断裂发育区和冷湖构造带为区域内主要的找矿找水远景区; 4) GMR 核磁共振系统在干盐滩地区理论探测深度为 130 m, 该系统不仅可以有效地探测自由水, 而且可以依据束缚水的分布解释地下各类含水盐类矿物和含水黏土矿物的存在与分布。

关键词: 核磁共振技术; 干盐湖; 地下卤水; 柴达木盆地; 盐湖资源; 昆特依干盐湖

Application of nuclear magnetic resonance (NMR) technology to study the space distribution features of underground brine from playa lakes: A case study of Kuntayi Playa Lake

YANG Xiumeng^{1,2,3}, LIU Wenyu^{1,2,3}, HAN Fengqing^{1,2**}, HAN Jilong^{1,2,3}, HUSSAIN Syed Asim^{1,2,3}, NIAN Xiuqing^{1,2,3}, MAO Qingfei^{1,2,3} & YAN Weide⁴

(1: Key Laboratory of Salt Lake Geology and Environment of Qinghai Province, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, P. R. China)

(2: Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, P. R. China)

(3: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China)

(4: Key Laboratory of Hydrogeology and Geothermal Geology of Qinghai Province, Hydrogeology, Engineering and Environmental Geology Survey Institute of Qinghai Province, Xining 810008, P. R. China)

Abstract: Kuntayi Playa Lake, located in the northwest of Qaidam Basin, is an extremely large comprehensive salt deposit. The Great Salt Beach is the largest salt beach in the Kuntayi Playa Lake with underground brine deposit, poor hydrogeological condi-

* 青海省应用基础研究计划项目(2014-ZJ-702) 和中国科学院青海盐湖研究所“一三五”战略发展规划项目联合资助。2016-12-24 收稿; 2017-03-27 收修改稿。杨修猛(1991 ~), 男, 硕士研究生; E-mail: yangxiuemeng2014@163.com.

** 通信作者; E-mail: hanfq@isl.ac.cn.

tions, and extremely low water content in the main seam, so it is difficult to exploit. Nuclear Magnetic Resonance (NMR) is an effective geophysical method currently used to detect groundwater directly. Comparing with the traditional geophysical methods, the NMR method is of higher resolution, more efficiency, more information and unique interpretation for hydrogeological investigations. In this paper, NMR sounding is used to study the space distribution characteristics of the underground brine. The NMR data were processed with the inversion, combined with geological and drilling data, and integrated with geological and geophysical interpretation for each measuring point. We find that in Kuntayi Playa Lake there are three brine aquifers exists from 0 to 130 m below the surface. The distribution of three brine aquifers is like funnel-shaped or approximate layer. The W_1 is latent brine formations, large permeability and coarse grain, with per unit volume of water of 0.4%–2.7%. The W_2 and W_3 are pressurized brine, low permeability and coarse grain, with per unit volume of water of 0.2%–1.1% and 0.1%–0.8% respectively. There existed two brine enrichment regions in the study area, the southwest centre of the exploration basin and the northeast basin. According to the distribution of brine and the structure in this area, we delimitate prospecting area of underground brine, the depositional centre of Great Salt Beach Synclinal, fault F1 to F8 and remote sensing fault F6 development areas in the north of the Great Salt Beach, cold-lake Structural belt. In dry salt lake area, the reliable detection depth of GMR system is 130 m. GMR systems can detect not only free water effectively, but also distribution of bound water to interpret the distribution rule of water-bearing salt minerals and aquiferous clay minerals.

Keywords: Nuclear magnetic resonance; playa lakes; underground brine; Qaidam Basin; salt lake resources; Kuntayi Playa Lake

柴达木盆地是我国内陆大型山间盆地之一,盆地内盐湖众多,分布广泛,是我国最主要的盐湖矿产资源富集区^[1]。昆特依干盐湖沉积盆地位于柴达木盆地西北部,是一个特大型钾盐、芒硝和石盐的综合盐类矿床,其资源总量高达500亿t^[2]。大盐滩属于昆特依干盐湖沉积盆地的5个矿区之一^[3],是一个以液体钾矿为主的特大型盐类矿产基地,其中液体KCl储量1659.54万t,固体KCl储量33.24万t^[4];曾有学者在该地区开展大量的地质调查及研究工作,对区域内地质构造特征、液体钾矿的成矿水文地质条件和水化学特征进行了一定程度的研究,分析了成矿物质来源及迁移富集条件^[5]。随着企业采卤的不断进行,地下卤水水位持续下降,企业面临着卤水资源难以持续供给的困境,因此,应用新型的地球物理勘探方法研究该地区地下卤水的赋存状态、分布特征及规律,圈定富卤远景区,对扩大新型地球物理勘探方法的应用范围和促进企业的可持续发展均有重要的科学意义和实际价值。

多年来盐湖矿产资源的勘查手段以工程钻探、探槽、浅井等为主。近年来,物探方法逐步应用在盐类资源的探测中,重力勘探利用岩盐密度较围岩低的特点,可用于圈定岩盐富集部位,推断岩盐空间形态^[6-8];自然伽马能谱测井曲线能够直接显示钾离子含量,并对含钾品位进行半定量分析^[9-11]。液体卤水矿作为盐类矿产资源的一种重要类型,地下卤水中可能赋存有丰富的钾、镁、锂、硼等多种资源,岳云宝^[12]等对富钾卤水的大地电磁探测建立了地质地电模型,为大地电磁探测方法在富钾卤水区的应用提供了依据;杨飞等^[13]总结了卤水层的波阻抗特征,进而利用三维地震资料对卤水层进行了识别与追踪,并圈定了富钾卤水层的分布范围。地面核磁共振方法是目前世界上唯一直接和非侵入性探测地下水的地球物理新方法^[14],相对于传统的地球物理方法而言,该技术具有高分辨力、高效率、信息量丰富和解的唯一性等优点^[15]。运用该方法可以有效地对地下卤水进行探测,并将观测到的地球物理数据转换成地下各含水层的深度、厚度、含水量以及平均孔隙度等水文地质参数^[13-18],进而推演出地下卤水的赋存状态和特征,得到地下卤水资源空间分布的基本信息。目前国外运用NUMIS系列核磁共振找水仪与TEM相结合的方法,根据地下电阻率以及弛豫时间的变化,直接有效地反演出地下含水层的岩性、含水量、盐度等的变化^[19-21]。何盛等^[22]前期利用该类仪器在盐湖区进行卤水矿的勘探研究,获得了一些初步结果。当前多数的核磁共振找水仪都只能接收较长的弛豫信号($T_2^* > 30$ ms),这便决定了该类核磁共振仪器只能探测地下存在的自由水,而无法探测束缚水^[23]。本次研究利用最新的美国GMR核磁共振找水仪,该仪器具有输出功率高、接收灵敏度高、具有较短的间歇时间等优点,不仅能够探测地下含水量,而且可以有效的区分自由水与束缚水,并且可以根据束缚水的存在解译盐湖区沉积的含水盐类矿物和黏土矿物的分布,因此GMR核磁共振找水仪在盐湖区具有很广泛的应用前景。

1 区域地质背景

昆特依干盐湖次级沉积盆地位于柴达木盆地北缘,为一个北西—南东向展布的盐湖沉积盆地^[23],北部被

阿尔金山走滑大断裂截切, 隶属于柴达木盆地北缘断块带西段. 在其发育形成过程中, 盆地早期发生明显的整体沉降作用, 后期受控于阿尔金山走滑大断裂, 中生代末期以来盆地整体处于压扭作用环境, 形成了具有扭动性质的压陷型沉降拗陷; 晚更新世干盐湖形成后, 阿尔金山以及冷湖、俄博梁构造带继续上升, 在干盐湖的北部及西部的局部地区拗陷形成洼地, 地下晶间卤水进入洼地, 经蒸发析出盐类沉积, 形成干盐滩^[23-24].

1.1 区域地层

区内地层有元古界、奥陶系、泥盆系、石炭系、侏罗系、古近系、新近系和第四系, 其中古近系、新近系以及第四系分布在山前地带及盆地内. 大盐滩的盐类矿物形成于下更新统, 中更新统开始出现石盐矿层及含钾矿物^[3], 表1为大盐滩矿床下更新统以来矿床地层与含水层的对应关系.

1.2 区域地质构造

整个研究区内断裂构造十分发育, 普遍具有长期、多次、复杂的活动特征; 按断裂走向可分为 NW、NNW、EW 及 NE 向 4 组, 其中以 NW、NNW 向规模最大, 其他方向次之(图1). 干盐滩西南部发育的双气泉(F9)深大断裂以及东北部发育的 F1 至 F8 断裂, 为研究区深部地下卤水的主要含水通道; 遥 F5 断裂和遥 F6 段裂, 在遥感 MSS 及 TM 图象上清晰, 纵贯大盐滩, 形成时代新, 是盆地内最有希望的含卤水构造^[4].

研究区周围褶皱构造主要有冷湖背斜构造带、俄博梁和葫芦山背斜构造带和俄博滩、大盐滩、大熊滩向斜. 冷湖构造带由冷湖〇、一、二、三、四、五号等 6 个背斜组成, 表现为典型的反“S”型旋转构造^[23]的一部分, 每个背斜构造的平面形态也呈现近似的反“S”型, 首尾相接和雁行排列^[24]. 俄博梁和葫芦山构造带, 由俄博梁 I、II 号及葫芦山背斜构造组成, 其中俄博梁 I 号是柴达木盆地北缘西段靠近阿尔金山的大型背斜构造^[23]. 在两个背斜构造带之间为俄博滩、大盐滩和大熊滩向斜, 其中大盐滩向斜为昆特依干盐湖的拗陷洼地, 因此地下卤水主要赋存于此处^[24].

表1 昆特依干盐湖矿床地层与含水层的对应关系(改自文献 [4])

Tab. 1 Corresponding relationship between the stratum and aquifer of Kunteyi Playa Lake
(modified from reference [4])

地层	岩性特征	含水层划分
全新统	含芒硝的石盐、含粉砂的石盐、含杂卤石的石盐、含光卤石的石盐粉砂, 夹黏土层	晶间潜卤水层
上更新统	含石膏石盐之淤泥、含石膏石盐之黏土	隔水层
	含芒硝的石盐、含杂卤石的石盐、含粉砂的石盐、芒硝石盐、含黏土(淤泥) 的石盐, 夹淤泥黏土薄层	晶间承压卤水层
中更新统	含石膏石盐之黏土、含石盐石膏之淤泥	隔水层
	含粉砂的石盐、含黏土的石盐、芒硝石盐、含石盐的芒硝等, 与淤泥黏土互层	晶间承压卤水层
	淤泥黏土为主、普遍含石膏	隔水层
	含粉砂的石盐、芒硝石盐、芒硝、含石盐的芒硝等, 与淤泥黏土互层	晶间承压卤水层
	含石膏的淤泥, 含石膏的黏土	隔水层
下更新统	含黏土的石盐、含芒硝的粉砂石盐、含淤泥的芒硝石盐、粉细砂, 淤泥黏土层之间夹盐层	晶间承压卤水层
	上部以淤泥为主, 次为黏土, 普遍含粉砂、石膏, 下部为砂岩、粉砂岩	隔水层

1.3 水文地质特征

大盐滩盆地无任何地表水体的直接补给, 地下水的补给条件很差, 主要接受大气降水和冰雪融水补给^[5, 28]. 地下水的赋存位置受构造和地貌的控制, 阿尔金山山体的上升和盆地褶皱的隆起, 构成了闭流的水文地质单斜盆地, 成为地下水的主要赋存场所. 盆地北部的阿尔金山降水充沛, 主峰终年积雪并发育现代冰川, 是区域地下水的主要补给来源; 降水和冰雪融水通过基岩裂隙和地表洪流渗透对山前地下水进行补给^[28-29]. 由山区到湖盆, 含水介质表现为从基岩裂隙到更新统碎屑岩类裂隙、孔隙再到盐类晶间卤水的变化特征, 水质

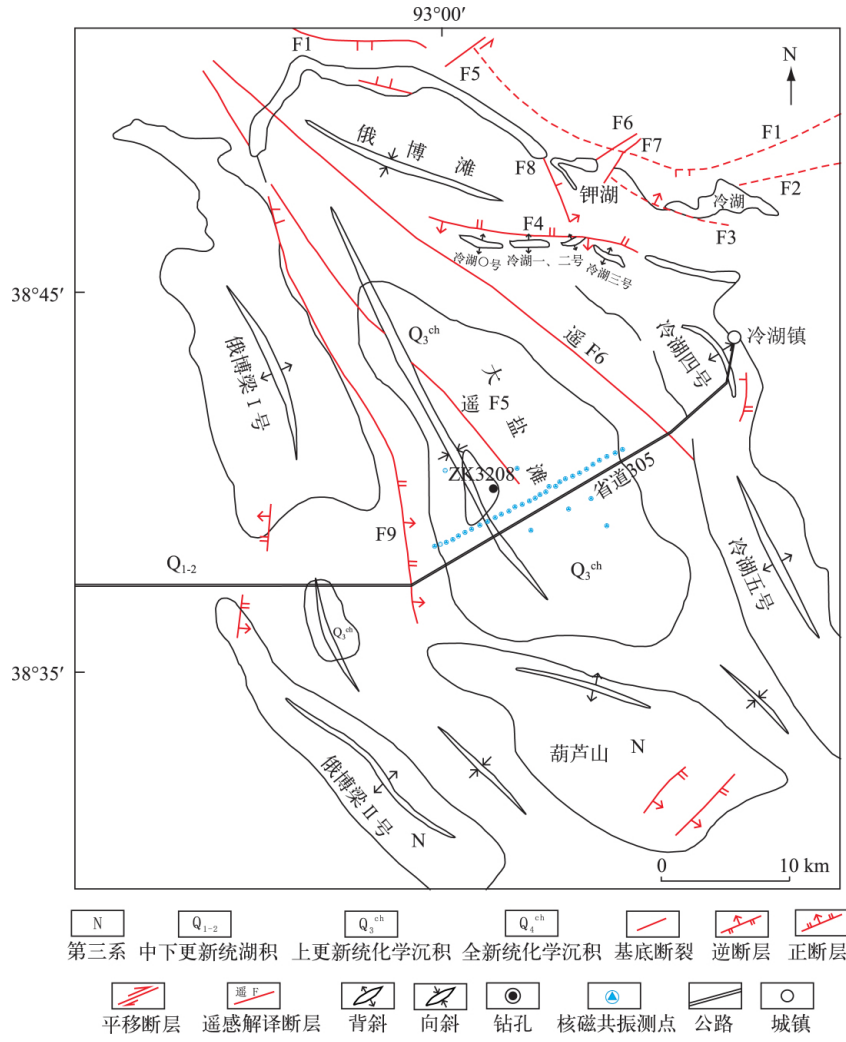


图 1 昆特依干盐湖区域构造及测点位置

Fig. 1 Location of Kuntayi Playa Lake and monitoring point arrangement

表现出由微咸水、咸水到卤水的变化特征,富水性也是从山区到山前、山前到湖盆逐步减弱。含水层结构则是由山前平原的单一潜水向湖盆逐渐过渡为上部潜水、下部承压水、深部油田水的双层乃至多层结构。

大盐滩地下水主要赋存于全新统、上更新统和中更新统地层中,按照产出时代和赋存条件,自上而下划分为晶间潜卤水层(W_I)和晶间承压卤水层(W_{II} 、 W_{III} 、 W_{IV} 、 W_V) (表 1)^[8]。除赋存于盐类晶体孔隙中的自由水以外,区域内广泛分布的芒硝($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$)、石膏($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)、杂卤石($K_2MgCa(SO_4)_3 \cdot 2H_2O$)、光卤石($KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$)中蕴含有一定量的结晶态和结构态的束缚水。

2 核磁共振数据采集与数据处理

2.1 数据采集

本次工作使用的是由美国 Vista Clara 公司生产的高品质多通道(用户可任意配置 4 通道为发射和接收)地面二维核磁共振找水仪(GMR),能够直接进行地下水探测和成像。该系统具有输出功率高、接收灵敏度高并由 pc 机控制等特点,采用多通道采集、参考回路压制干扰和自适应消噪技术明显提高了系统的抗干

扰能力,其接收器的开路噪声密度为 $0.3 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$,接近低的极限值^[6],间歇时间(死时间) $< 5 \text{ ms}$,是当今世界上最先进的直接探测地下水的仪器,仪器组成及连接如图 2 所示.

为研究整个向斜盆地地下卤水的分布特征,同时避开较强的电磁干扰,选择在大盐滩向斜中部,省道 305 以北 2 km 处,大体垂直于向斜轴布设一条走向为 57° 的测线,穿过整个大盐滩向斜,共布设测点 30 个,点距 $500 \sim 2000 \text{ m}$ 不等,其中在盆地西北部的沉积中心,以 500 m 点距布设测点,另外设计单个测点 6 个,分布于整个研究区,整个研究区面积约为 350 km^2 (图 1). 省道 305 附近的高压线、信号塔为研究区内主要的电磁干扰源,因此将噪声线圈布置于省道 305 一侧,以尽可能地消除噪声干扰,提高信噪比.

野外数据采集时,激发线圈采用 $150 \text{ m} \times 150 \text{ m}$ 的正方形,噪声线圈为 $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ 的正方形,供电电压为 24 V ,激发频率 $f_0 = 42.58 \times B_0$ (B_0 为测点地磁场总强度),测点地磁场值通过质子磁力仪测量,各测点地磁场强度不同,但均在 $54.750 \mu\text{T}$ 左右,调谐电容为 $3.5 \mu\text{F}$,最大脉冲矩为 $22 (\text{A} \cdot \text{s})$ 、最大脉冲矩与最小脉冲矩比值为 100,叠加次数 16 次、记录长度 240 ms ,脉冲持续时间 40 ms ,脉冲矩数量为 64 个,使用 GMR Daq 程序采集和保存数据,每个测点平均采集时间为 $2 \sim 3 \text{ h}$.

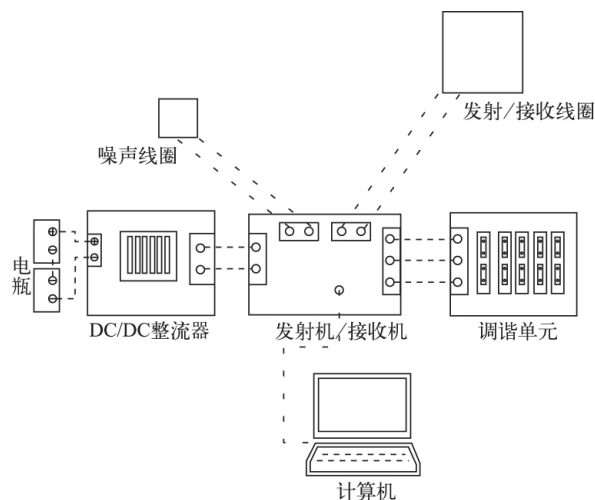


图 2 GMR 工作站仪器连线

Fig. 2 Instrument on-line diagram of GMR working station

2.2 数据处理与反演

使用 GMR Daq 程序采集的单次叠加数据独立保存,为及时检查数据质量,在第一次叠加完成后,GMR QC 程序利用专有的基于参考线圈的自适应对消(reference coil-based noise cancellation) 处理算法对原始数据进行滤波处理与噪声去除^[12,31],并合成一个叠加 GMR 探测数据用于一维反演. 对测点 GMR1206 和 GMR1212 的探测数据进行基于参考线圈的自适应对消处理,结果充分说明测点环境噪声较低、信噪比高、数据质量较高,可对探测数据进行反演(图 3) .

使用 GMR 1D 程序对 GMR 探测数据进行反演,该软件运用稳定的基于多弛豫时间的 QT 反演方法进行数据反演^[32]. 反演参数设置如下: 空间正则化系数设为 0.02,最大深度设为 150 m ,最小深度设为 0.5 m ,层数与脉冲矩数量均设为 64. 对 GMR 探测数据进行反演,得到的参数包括 NMR 信号初始振幅 E_0 、平均弛豫时间 T_2^* 、NMR 信号频率和 NMR 信号初始相位 φ_0 等. 对这些参数进行解译后即可得到相应的水文地质参数: 各含水层的深度、厚度、单位体积含水量和含水层类型(平均孔隙度) 等.

3 结构模型分析与误差评价

3.1 结构模型分析

以测点 GMR1206 为例,该测点位于沉积盆地中心附近,钻孔 ZK3208 西南 4 km 处,测点位置及反演结

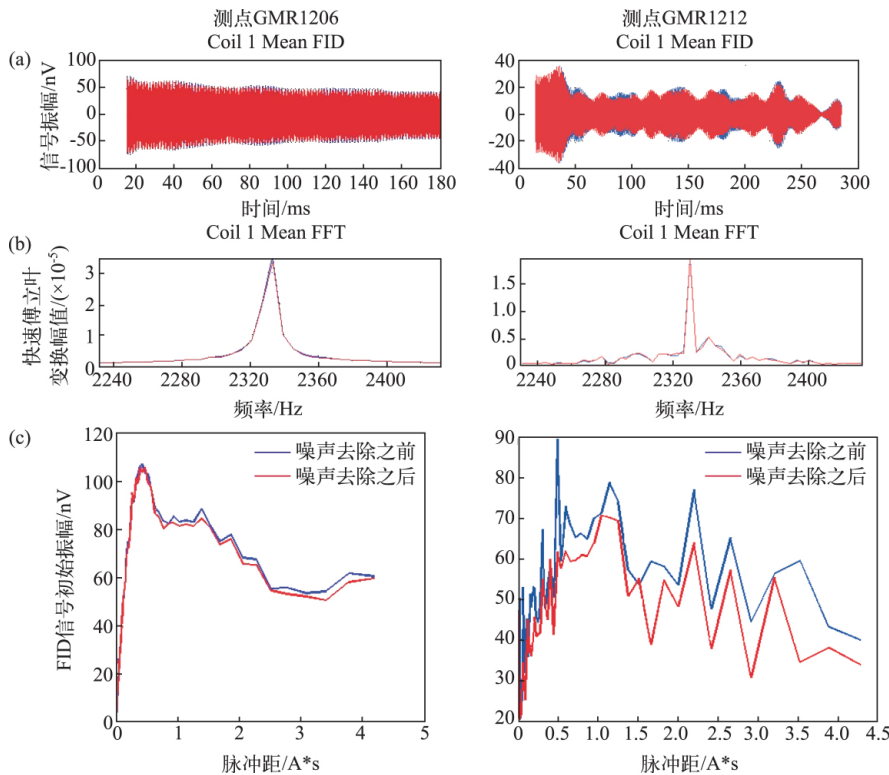


图3 基于参考线圈的 NMR 信号自适应噪声对消结果(蓝色为实测数据,红色为数据处理结果):
NMR 信号时域图(a); NMR 信号频域图(b); NMR 信号初始振幅(c)

Fig.3 Adaptive noise cancellation of NMR signal based on reference coil(Blue: NMR signal before noise cancellation; Red: NMR signal after noise cancellation) : Mean FID averaged over 64 individual data records with different pulse moments (a) ; Mean FID averaged over 64 individual data records with frequency spectra (b) ; Initial FID amplitude (c)

果均具有相当好的代表性,因此根据该点反演得到的核磁共振参数,解译出相应的水文地质参数,同时结合地质情况,对该测点结构模型进行分析。

图4a为利用脉冲距 q 和接收到的信号振幅 E_0 绘制的 $E-q$ 曲线,亦称为测深曲线^[3];信号振幅的高值异常充分表明地下水分子中的氢核已激发产生了核磁共振信号,主要反映地下含水量大小,而峰值所对应的脉冲距大小反映其含水层的埋深,曲线跨越值则反映其含水层厚度。由图4a可以看出,测点GMR1206的初始振幅峰值 E_0 最大为106 nV,为主要含水层中心,含水层厚度中等。图4b为一维反演成果图,该图反映自由感应衰减信号FID(free induction decay)、 T_2^* 、NMR频率和相位随深度的变化。其中,FID信号能够指示地下岩层的渗透系数,FID信号越大,含水层渗透系数越大,反之越小。由图4b可以看出,2~15 m之间的岩层渗透系数明显比其他岩层更大,而其余岩层渗透系数则很小。 T_2^* 大小可反映地下含水层的松散属性即含水层类型(平均孔隙度)的信息,平均孔隙度大, T_2^* 值也大^[4],依据测点GMR1206的 T_2^* 变化曲线可知,与下部岩体颗粒相比,在0~72 m之间的岩层岩体颗粒较粗,孔隙较大。NMR信号频率随深度的变化显示每层深度的NMR信号信噪比,稳定的信号频率显示高信噪比,在地下130 m以内,频率十分稳定,在地下约130 m处,频率发生明显的不稳定变化,说明本次测量在地下130 m以内信噪比高,探测的理论可靠深度为130 m。NMR信号的初始相位 φ_0 是天线中激发的电流与测量到的衰减电压之间的相位差^[3],受电阻率变化的影响较大,能够反映地下介质的导电性^[5-3d],其特点是随着地下介质导电性增强, φ_0 值由小变大,当地下介质不导电时, $\varphi_0=0$ ^[3]。该测点地下存在3个低电阻率层位,由于区域内地下主要为含盐类矿物岩层,电阻率较

高,而只有当岩层中赋存有卤水时,岩层的导电性增强,表现为低电阻率,因此推断该点地下3个低电阻率层位为地下含卤水层. 图4c为单位体积含水量分布图,通过该图可以得到测点不同深度的含水量以及束缚水、自由水的组成. 地下水的自由移动特性越好,其 T_2^* 值就越大,地下水的自由移动特性越差,则 T_2^* 值就越小^[38-39]. 基于国内外的研究统计规律,通常自由水的 T_2^* 变化范围在30~1000 ms之间;而束缚水的 T_2^* 值小于30 ms^[40]. GMR仪器能够在传输脉冲结束后5 ms之内测量信号;如此短的间歇时间能够更精确地测量自由感应衰减属性(具体包括初始振幅和 T_2^* 值)^[41]. 因此GMR系统能够接收到束缚水的NMR信号,同时探测到束缚水与自由水,这是较NUMIS PLOY系统更先进的地方. 根据图4c可以看出,该点地下探测范围内大致存在3个含水层:2~18 m之间含水率为0.5%~1.5%;22~35 m含水率为0.3%~0.4%;42~75 m含水率为0.2%左右. 该地区的束缚水主要为一些盐类矿物晶体中的结晶水,如杂卤石($K_2MgCa(SO_4)_3 \cdot 2H_2O$)、芒硝($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$)、光卤石($KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$)以及石膏($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)等矿物中均含有一定量的结晶水,可以依据束缚水的分布推断地下岩层中该类矿物的存在.

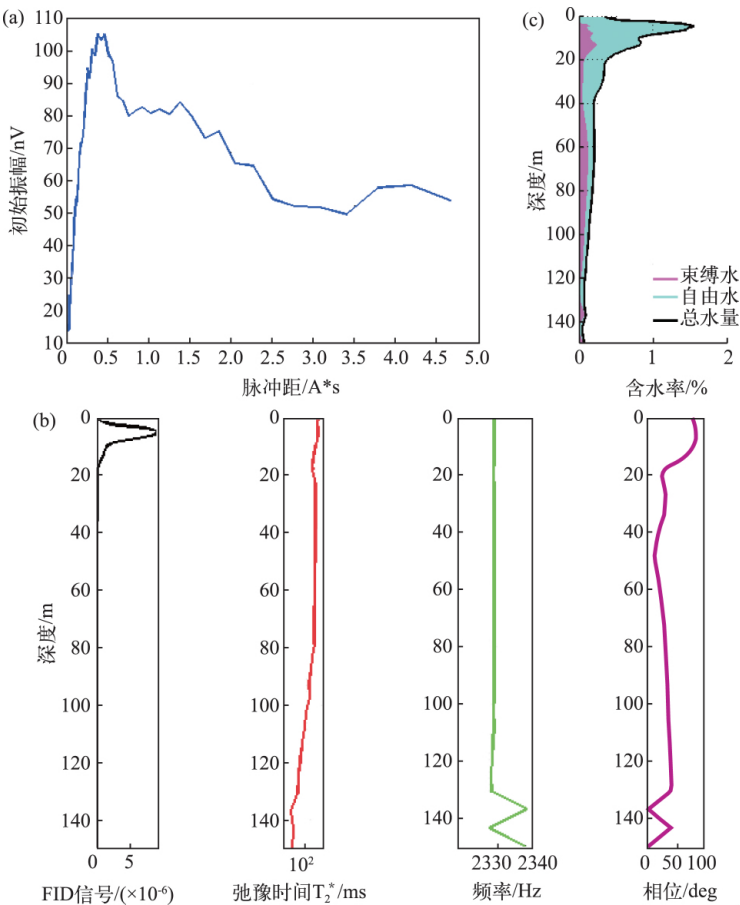


图4 GMR1206 测点 GMR 反演成果: 初始振幅测深曲线(a); 一维反演成果(b); 单位体积含水率分布(c)
Fig. 4 GMR1206 point inversion result for measuring point GMR1206: Nital amplitude sounding curve (a); One-dimensional inversion (b); Unit volume water content (c)

综合上述解释结果及地质情况,可以确定测点 GMR1206 地下含水结构模型: 第1 含水层位于地下2~18 m,厚16 m,渗透系数大、颗粒较粗,自由水含水率为0.5%~1.3%,束缚水含水率为0.2%~0.3%,该含水层的岩性可能为中粗粒盐,含有一定量的光卤石、芒硝等含水盐类矿物;第2 含水层位于地下22~35 m,渗

透系数较小、颗粒较粗,自由水含水率为 0.3% ~ 0.4%,束缚水含量极少,故该含水层的岩性可能为中粒石盐,颗粒之间充填有一定的淤泥;第 3 含水层位于地下 42 ~ 75 m,渗透系数较小、颗粒较粗,总含水率为 0.2% 左右,其中束缚水占比较大,故该含水层岩性为中粒石盐,含有一定的杂卤石、芒硝等含水盐类矿物。

3.2 结构模型误差评价

核磁共振测点数据误差评价主要依据钻孔验证,进行单点的结构模型分析,将其推断的地质柱状图与钻孔柱状图进行对比,以验证数据质量。

测点 GMR1212 位于沉积盆地中心附近,钻孔 ZK3208 东南 2 km 处,与 ZK3208 的连线大致平行于大盐滩向斜轴线,因此与 ZK3208 具有一定的可比性。依据该点的反演成果(图 5)进行结构模型分析,确定地下含水结构模型:0 ~ 3 m 为含光卤石、钾石盐之粉细砂,3.0 ~ 12.5 m 为第 1 含水层,自由水含水率约为 0.4% ~ 1.0%,束缚水含水率为 0.4% ~ 0.7%,推测岩性为中粗粒石盐,且含有一定的光卤石、杂卤石等含水盐类矿物;12.5 ~ 15.0 m 为隔水层,推测岩性为含盐淤泥;15 ~ 28 m 为第 2 含水层,自由水含水率约为 0.2% ~ 0.4%,束缚水含水率为 0.2% ~ 0.5%,推测岩性为含淤泥之中粗粒石盐,且含有一定的杂卤石、芒硝等含水盐类矿物;28 ~ 36 m 为隔水层,岩性为含石膏、石盐淤泥;36 ~ 70 m 为第 3 含水层,总含水率约为 0.6%,其中束缚水占比较大,故该含水层岩性为含泥中粒石盐,且含有一定的杂卤石、石膏等含水盐类矿物;70 ~ 150 m 为含盐淤泥。

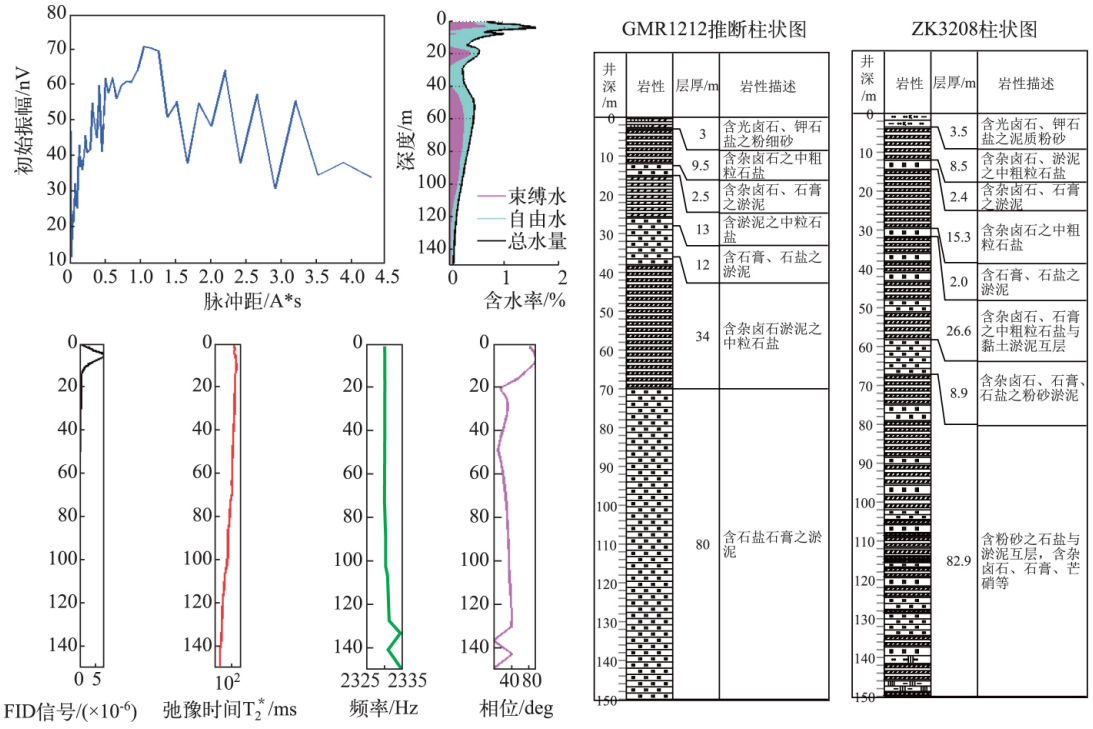


图 5 测点 GMR1212 反演成果与已知钻孔对比

Fig. 5 GMR1212 point inversion result with known borehole comparison chart

根据测点 GMR1212 地下含水结构模型绘制该点推断柱状图,并与 ZK3208 进行对比(图 5)发现,测点 GMR1212 与 ZK3208 所揭示的含水层信息大体一致,其推断的 3 个含水层埋深误差分别为 -14.3%、4.2% 和 13.6%;含水层厚度误差分别为 11.8%、15% 和 27.8%;对于钻孔揭露的地层岩性,由于地面核磁共振方法只是通过渗透系数、孔隙率大小以及束缚水的存在对地层岩性进行推断,因此很难对薄层以及互层或相对物性差异较小的层位进行区分,只能大概对地层进行划分。

4 大盐滩地下卤水的分布特征研究

卤水在地下以自由水的形式存在,将本次 GMR 测点数据中的束缚水筛除,对自由水含水率进行统计、分析,并结合以往地质资料,认为整个研究区 0~130 m 深度范围以内,卤水共分 3 层,含水层类型为晶间潜卤水层和晶间承压卤水层(表 2)。如图 6 所示,含水层主要呈扁平状或漏斗状、近似层状展布,与附近钻孔层位有很好的对应关系;岩性以石盐、含粉砂石盐、含芒硝石盐、芒硝石盐为主,同时含有光卤石、杂卤石、钾石盐等含钾矿物。其中 W_1 和 W_2 卤水矿层的含卤水量较大、埋藏浅,易于开采,而 W_3 卤水矿层则含卤水量低且埋藏较深,不具有开采价值。

表 2 研究区地下含水层特征

Tab. 2 Underground aquifer characteristics in the study area

含水层	含水层类型	含水层顶板埋深/m	含水层厚度/m	单位体积含水率/%
W_1	晶间潜卤水层	1~2.5	2~16	0.4~2.7
W_2	晶间承压卤水层	11~23	6~18	0.2~1.1
W_3	晶间承压卤水层	22~50	16~28	0.1~0.8

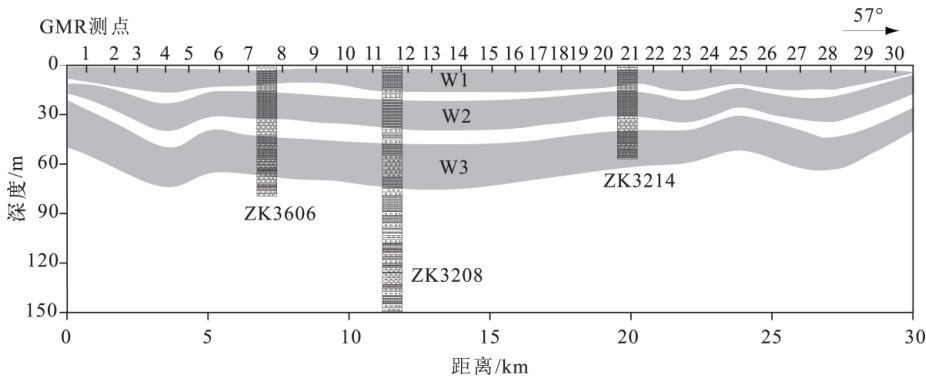


图 6 研究区地下卤水含水层剖面

Fig. 6 Sectional view of the underground brine aquifer in the study area

对研究区所有 GMR 测点所反演的 W_1 和 W_2 含水层单位体积含水量进行相加,进而绘制了主要含水层卤水含量平面分布图(图 7),同时结合企业提供的资料数据,圈定了区内主要富卤区(图 8),并总结出整个大盐滩地区地下卤水分布规律如下:(1)中南部的沉积盆地中心是主要富卤区,圈定为 I 号富卤区,单位体积卤水含水量为 1.2%~2.7%,面积约 100 km²;(2)东北部为次级富卤区,圈定为 II 号富卤区,从剖面上观察,该富卤区赋存于大盐滩向斜的次级褶皱中,单位体积含水率为 0.9%~1.5%,面积约 55 km²;(3)边缘区由于盐岩层剥蚀出露,富水性差;(4)中东部地势较平缓、盐结晶层沉积厚且致密,卤水赋存条件不理想;(5)南部区和北部区地质条件复杂,尚未进行详细勘查,情况不明,但依据详查储层资料分析,应当具有一定的卤水富集条件。

根据核磁共振反演结果获得富卤区地下含水层厚度及地下卤水单位体积含水率,同时结合前人钻孔及水化学资料,确定富卤区 KCl 品位。其中 I 号富卤区可由钻孔 ZK3208 控制,晶间潜卤水 W_1 的 KCl 品位为 1.97%,比重为 1.249,晶间承压卤水 W_2 的 KCl 品位为 1.28%,比重为 1.262;II 号富卤区可由钻孔 ZK3216 控制,晶间潜卤水 W_1 的 KCl 品位为 0.85%,比重为 1.233,晶间承压卤水 W_2 的 KCl 品位为 1.26%,比重为 1.251^[28,43]。据此可以估算大盐滩地区西南部 I 号富卤区 KCl 储量约为 122 万 t;东北部 II 号富卤区 KCl 储量约为 23 万 t。

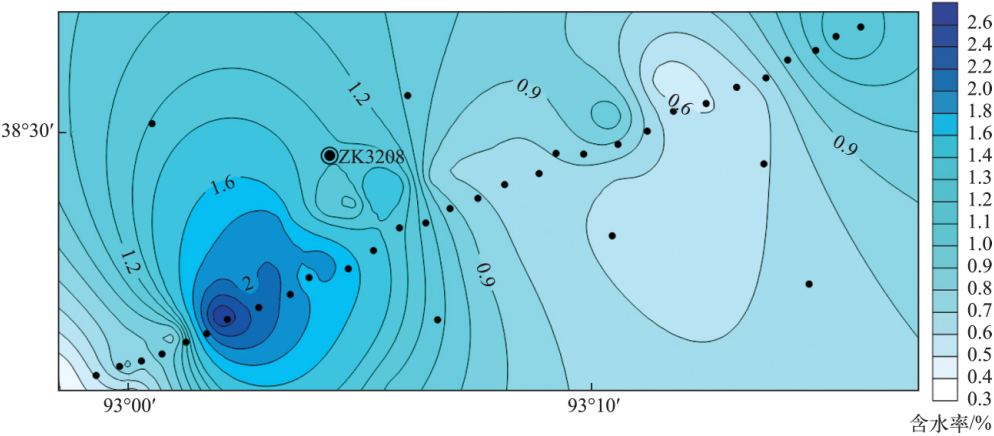


图 7 研究区地下水卤水含水率等值线分布

Fig. 7 Contour map of underground brine distribution in the study area

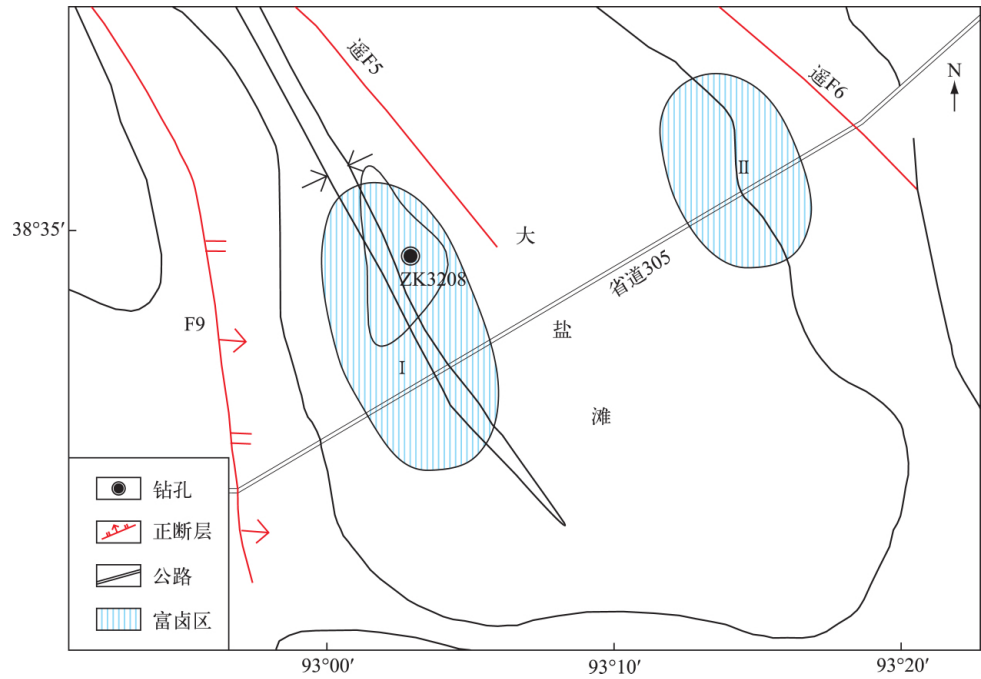


图 8 研究区内主要富卤区预测

Fig. 8 Prediction of main rich brine in the study area

5 研究区内含水盐类矿物分布规律的探讨

本次利用核磁共振技术在研究区内所探测到的束缚水,推测主要为研究区内广泛沉积的含水盐类矿物中的结晶水,如芒硝($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) 的含水率为 55.9%,石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 的含水率为 20.9%,光卤石($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 的含水率为 38.9%,杂卤石($\text{K}_2\text{MgCa}(\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 的含水率为 7.7%. 因此束缚水分布规律,能够直接用于表示地下含水盐类矿物的分布规律.

区内束缚水在纵向上的分布与地下卤水层位大体一致,总体分为 3 层,这说明含水盐类矿物主要赋存

于作为含水层的石盐层中. 同时,束缚水纵向分布上,有明显的层位间断以及变薄尖灭,而在横向分布上则相应的表现为明显的聚集性(图 9) ,这可能是一些呈透镜状的含水盐类矿物层(图 10) ,如芒硝层、石膏层、杂卤石层等.

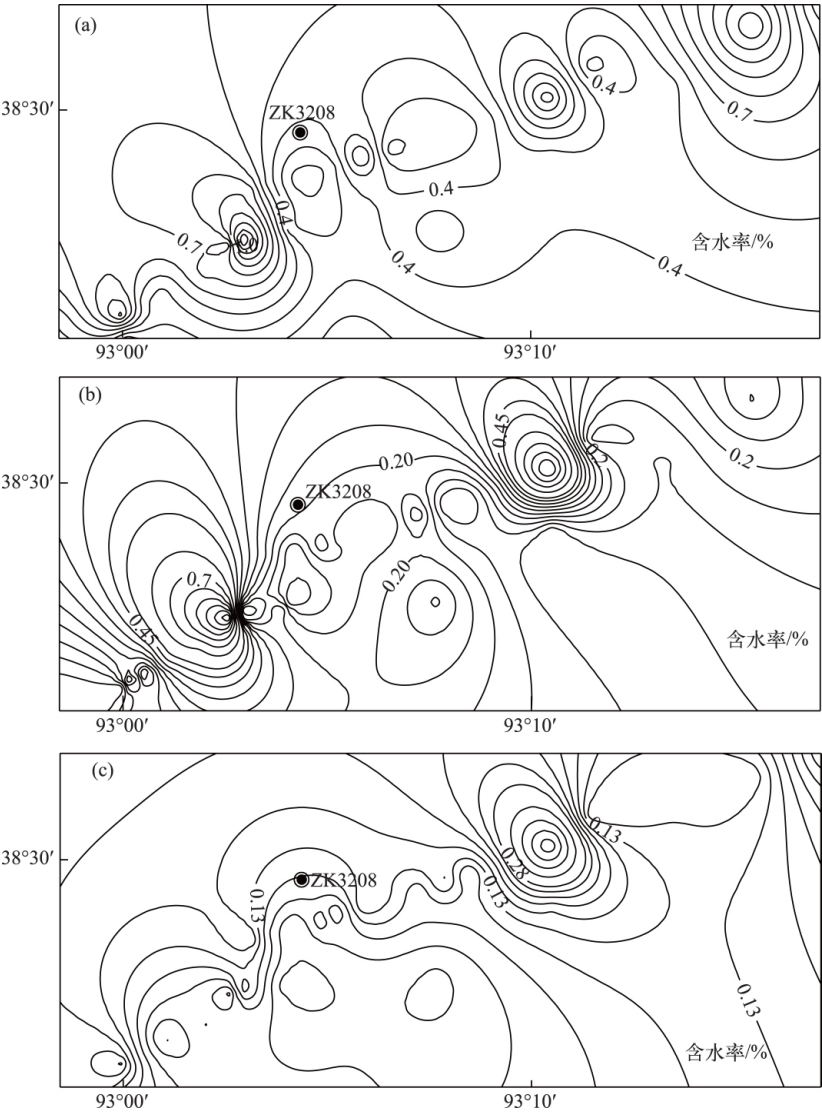


图 9 研究区地下束缚水含水率等值线分布: 第 1 束缚水层(a) ; 第 2 束缚水层(b) ; 第 3 束缚水层(c)

Fig. 9 Contour map of underground bound water distribution in the study area:

The first bound water (a) ; The second bound water (b) ; The third bound water (c)

目前对于磁共振技术所探测到的束缚水信号,只能结合研究区地质资料,解译为含水矿物,并根据束缚水的分布对含水矿物的分布规律进行探讨研究,由于缺乏相关的物性特征及理论实验,现阶段尚不能根据信号特征进行具体的矿物识别与解译.

6 地下卤水找矿远景

通过对大盐滩研究区内地下卤水的分布特征研究可以看出,整个研究区内虽存有一定的地下卤水,

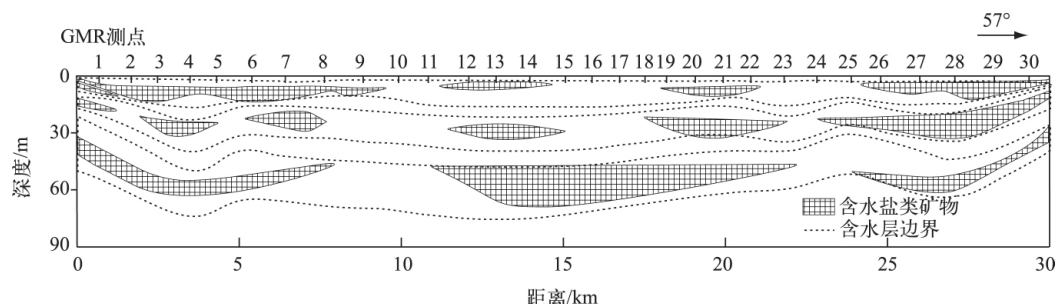


图 10 研究区地下含水盐类矿物分布模型

Fig. 10 Distribution model of hydrous saline minerals in study area

但是整体富卤性并不理想,需开展更进一步的地下卤水探测。根据区域地下卤水分布规律以及构造特征,可以划定 3 个主要找矿远景区,作为下一步卤水找矿的重点工作区域。

1) 大盐滩向斜沉积中心位于大盐滩的西部, I 号富卤区处于大盐滩向斜沉积中心的中南部,为大盐滩向斜的主要富卤地区,下一步需对整个大盐滩沉积中心进行找矿调查。

2) 大盐滩向斜东北缘,靠近北部的阿尔金山,断裂构造发育,主要发育有 $F_1 \sim F_8$ 断裂及遥 F_6 断裂,使得整个区域具有较好的地下水补给及赋存条件。横向上阿尔金山的冰雪融水通过地表径流及导水断裂补给该区域,纵向上遥 F_6 可能为深部导水断裂,能够连通地下深部卤水层,因此该区域断裂带有很好的卤水资源远景。

3) 冷湖构造带为区域内主要的储油构造,在油气藏中,通常都包含有油、气和水,按重力分异,油田水位于油气之下,该构造带内油气已基本开采殆尽,而构造带内赋存的油田水可作为该区域重要的固体钾矿溶矿补给,对于支持矿区固体钾盐的开采、扩大资源量具有十分重要的意义。

7 参考文献

- [1] Zhang PX *et al* eds. Saline lake in the Qaidam Basin. Beijing: Science Press, 1987: 1. 张彭熹等. 柴达木盆地盐湖. 北京: 科学出版社, 1987: 1.]
- [2] Han FQ, Huang Q, Wang KJ *et al*. Study of geochemical evolution and palaeoclimatic fluctuation of Kuntayi salt lake in the Qaidam Basin, Qinghai. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1995, 26(5): 502-508. 韩凤清, 黄麒, 王克俊等. 柴达木盆地昆特依盐湖的地球化学演化与古气候变化. *海洋与湖沼*, 1995, 26(5): 502-508.]
- [3] Tian XD, Li HP, Wang YS *et al*. Study on the hydrochemical characteristics of the Xinyandai latent brine in the north of Qaidam Basin. *Journal of Salt and Chemical Industry*, 2013, 42(12): 8-12. 田向东, 李洪普, 王云生等. 柴达木北部新盐带卤水水化学特征研究. *盐业与化工*, 2013, 42(12): 8-12.]
- [4] Bao SJ ed. Qinghai Province Lenghu town Kuntayi orefield salinas grandes potassium deposit detailed survey report. Xining: Qinghai Institute of Geology and Mineral Resources Exploration, 2002. 保守君. 青海省冷湖镇昆特依矿田大盐滩钾矿床详查报告. 西宁: 青海省地质矿产勘察院, 2002.]
- [5] Li CZ *et al* eds. Qinghai Province, Lenghu town Kuntayi potash survey report. Xining: Qinghai Qaidam Comprehensive Geological Exploration Group, 1990. 黎成忠等. 青海省冷湖镇昆特依钾矿普查报告. 西宁: 青海省柴达木地质地质勘察大队, 1990.]
- [6] Cui TX. Collective application of geological and geophysical methods to prospecting for potash resource. *Geology of Chemical Minerals*, 1995, 17(3): 198-206. 崔天秀. 钾盐找矿工作中的综合地球物理-地质研究. *化工矿产地质*, 1995, 17(3): 198-206.]
- [7] Song XC, Deng XL, Zhao YH *et al*. The application of gravity preferential upward continuation in Baicheng sunken finding salt (potassium salt). *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2013, 10(4): 505-511. 宋小超, 邓小林, 赵玉海等. 重力优选向上延拓技术在拜城凹陷找盐(钾盐)的应用. *工程地球物理学报*, 2013, 10(4): 505-511.]
- [8] Wang BL. Geological effects of reinterpreting geophysical prospecting outcomes in the Mengyejing rock salt (potash salt)

- ore district of Yunnan Province. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 1989, 13(4): 290-299. [汪宝禄. 云南勐野井岩盐(钾)矿区物探成果再解释的地质效果. 物探与化探, 1989, 13(4): 290-299.]
- [9] Wang YH, Shi GC, Ye C. Application of geophysical well logging in Laos potash deposit exploration. *Value Engineering*, 2016, 18(3): 180-182. [汪云昊, 石国成, 叶城. 地球物理测井在老挝钾盐矿勘查中的应用. 价值工程, 2016, 18(3): 180-182.]
- [10] Yue YB. The study on the magnetotelluric sounding method in research for brine rice in potassium of central Sichuan area [Dissertation]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013. [岳云宝. 川中地区三叠纪富钾卤水大地电磁探测应用研究 [学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2013.]
- [11] Yang F, Pan YD, Zhang XG *et al.* Tracing potassium resources by 3D seismic data. *Geology of Chemical Minerals*, 2011, 33(1): 54-57. [杨飞, 潘源墩, 章学刚等. 利用三维地震资料追踪富钾卤水储层. 化工矿产地质, 2011, 33(1): 54-57.]
- [12] Lin J. Situation and progress of nuclear magnetic resonance technique for groundwater investigations. *Progress in Geophysics*, 2010, 25(2): 681-691. [林君. 核磁共振找水技术的研究现状与发展趋势. 地球物理学进展, 2010, 25(2): 681-691.]
- [13] Legchenko A, Baltassat JM, Beauce A *et al.* Nuclear magnetic resonance as a geophysical tool for hydrogeologists. *Journal of Applied Geophysics*, 2002, 50: 21-46.
- [14] Liu GH, Zhang XM, Jia XM *et al.* eds. New technology of electrical prospecting for groundwater resources. Beijing: Seismological Press, 2007: 106. [刘国辉, 张献民, 贾学民等. 地下水资源电法勘探新技术. 北京: 地震出版社, 2007: 106.]
- [15] Li ZY, Li JL, Pan YL. Summary of groundwater detection with surface nuclear magnetic resonance method. *Progress in Exploration Geophysics*, 2002, 25(6): 55-58. [李振宇, 李俊丽, 潘玉玲. 地面核磁共振找水方法综述. 勘探地球物理学进展, 2002, 25(6): 55-58.]
- [16] Dai M, Hu XY, Wu HB *et al.* Inversion of surface nuclear magnetic resonance. *Chinese J Geophysics*, 2009, 52(10): 2676-2682. [戴苗, 胡祥云, 吴海波等. 地面核磁共振找水反演. 地球物理学报, 2009, 52(10): 2676-2682.]
- [17] Bernard J. Numis poly multi-channel mrs system magnetic resonance system. User's manual. France. 2010.
- [18] Zhu QJ, Pan YL, Li FZ *et al.* eds. Specification for water technology of surface nuclear magnetic resonance method. Beijing: China Geological Survey, 2012. [朱庆俊, 潘玉玲, 李凤哲等. 地面核磁共振找水技术规程. 北京: 中国地质调查局, 2012.]
- [19] Legchenko A, Baltassat JM, Bobachev A *et al.* Magnetic resonance sounding applied to aquifer characterization. *Ground Water*, 2004, 42(3): 363-373. DOI: 10.1111/j.1745-6584.2004.tb02684.x.
- [20] Legchenko A, Ezersky M, Camerlynck C *et al.* Joint use of TEM and MRS methods in a complex geological setting. *Comptes rendus-Géoscience*, 2009, 341(10): 908-917. DOI: 10.1016/j.crte.2009.07.013.
- [21] He S, Jiang HH, Chang YQ *et al.* Application of MRS method in exploration brine potassium ore in saline lake district. *Press in Geophysics*, 2015, 30(1): 332-338. DOI: 10.6038/pg20150148. [阿盛, 蒋厚辉, 苒有全等. 核磁共振测深方法在盐湖区卤水钾矿勘查中的应用. 地球物理学进展, 2015, 30(1): 332-338.]
- [22] Schirov M, Legchenko A, Creer G. New direct noninvasive ground water detection technology for Australia. *Exploration Geophysics*, 1991, 22: 333-338. DOI: 10.1071/EG991333.
- [23] Sun GQ, Zhao MJ, Guo JM *et al.* Development characteristics and tectonic evolution of Cenozoic strata in kunteyi depression. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(1): 102-107. [孙国强, 赵明君, 郭建明等. 昆特依凹陷中生界、新生界发育特征及构造演化分析. 天然气地球科学, 2011, 22(1): 102-107.]
- [24] Zhang PX, Zhang BZ, Tang Y *et al.* eds. The extremely exploitation and utilization of natural resources in Saline Lake of China. Beijing: Science Press, 1999: 60. [张彭熹, 张保珍, 唐渊等. 中国盐湖自然资源极其开发利用. 北京: 科学出版社, 1999: 60.]
- [25] Xu W, Bao JP, Liu T *et al.* Evaluation on hydrocarbon source rock of lower Jurassic, Lenghu Area, northern margin of Qaidam Basin. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(5): 707-712. [徐文, 包建平, 刘婷等. 柴达木盆地北缘冷湖地区下侏罗统烃源岩评价. 天然气地球科学, 2008, 19(5): 707-712.]
- [26] Zhang XJ. Tectonic Deformation characteristics and structural stress simulation in Meso-Cenozoic Era in northern Qaidam [Dissertation]. Beijing: Chinese Academy of Geosciences, 2007. [张西娟. 柴北缘地区中生代构造变形与构造应

- 力场模拟 [学位论文]. 北京: 中国地质科学院, 2007.]
- [27] Wang GP. Dynamics of hydrocarbon accumulation of the Eboliang structural belt in the west section of the northern margin of Qaidam Basin [Dissertation]. Xi'an: Northwest University, 2013. [王高平. 柴达木盆地北缘西段鄂博梁构造带成藏动力研究 [学位论文]. 西安: 西北大学, 2013.]
- [28] Wang ML, Yang ZC *et al* eds. Potash deposits and their exploitation prospects of Saline Lakes of the northern Qaidam Basin. Beijing: Geological Publishing House, 1997: 1. [王弼力, 杨智琛等. 柴达木盆地北部盐湖钾矿床及其开发前景. 北京: 地质出版社, 1997: 1.]
- [29] Zhang JH, Ren JR, Zhang ZG. Aquifers Hydrogeological characteristics of Kuntay Salt Lake. *Journal of Lake Research*, 2011, 19(2): 7-9. [张嘉好, 任金润, 张兆广. 昆特依大盐滩矿床储卤层水文地质特征的分析. 盐湖研究, 2011, 19(2): 7-9.]
- [30] Zhang CD, Li ZY, Pan YL. Development of MR sounding technology. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2011, 8(3): 314-322. [张昌达, 李振宇, 潘玉玲. 磁共振测深技术发展现状. 工程地球物理学报, 2011, 8(3): 314-322.]
- [31] Shang XL. The key technology of TEM-MRS for groundwater detection [Dissertation]. Changchun: Jilin University, 2010. [尚新磊. TEM-MRS 联用地下水探测关键技术研究 [学位论文]. 长春: 吉林大学, 2010.]
- [32] Jiang CD. Development of 2D/3D magnetic resonance tomography and array surface NMR system for groundwater exploration [Dissertation]. Changchun: Jilin University, 2013. [蔺川东. 核磁共振 2D_3D 地下水成像方法及其阵列式地面探测系统研究 [学位论文]. 长春: 吉林大学, 2013.]
- [33] ZhaoYP, Wang XZ, Wang WT. Application and research on the Nuclear Magnetic Resonance (NMR) groundwater detection technology for exploring water resource and salt-fresh water interface. *Geological Survey and Research*, 2011, 34(1): 76-80. [赵义平, 汪馨竹, 王文婷. 核磁共振地下水探测技术在水源勘察及确定地下咸淡水界面中的应用研究. 地质调查与研究, 2011, 34(1): 76-80.]
- [34] Zhang LC, Li DH. Effect on information of NMR by rock types and the water in rock. *Journal of Hebei Institute of Architectural Science and Technology*, 2002, 19(1): 71-74. [张立才, 李大华. 岩石类型与土层赋存状态对地面 NMR 的影响. 河北建筑科技学院学报, 2002, 19(1): 71-74.]
- [35] Cao GQ, Zhou ZH. Application of the surface nuclear magnetic resonance method to detecting groundwater in granite regions. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2006, 2: 108-113. [曹光奇, 周仲华. 地面核磁共振找水方法在花岗岩地区的应用. 水文地质工程地质, 2006, 2: 108-113.]
- [36] Peng Y, Li F, Pan JW *et al*. Inversion of resistivity by the phase of SNMR signal. *CT Theory and Applications*, 2016, 25: 41-47. DOI: 10.15953/j.1004-4140.2016.25.01.05. [彭耀, 李凡, 潘剑伟等. 地面核磁共振信号相位求取电阻率. CT 理论与应用研究, 2016, 25: 41-47.]
- [37] Li ZY, Pan YL, Zhang B *et al*. Using NMR method research the hydrogeology problems and practical examples. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2003, 4: 50-54. [李振宇, 潘玉玲, 张兵等. 利用核磁共振方法研究水文地质问题及应用实例. 水文地质工程地质, 2003, 4: 50-54.]
- [38] Cao FX, Li FZ. Application of surface NMR in water research and its effect. *Coal Geology of China*, 2007, 19(1): 66-70. [曹福祥, 李凤哲. 地面核磁共振 (NMR) 找水技术及其应用效果浅析. 中国煤田地质, 2007, 19(1): 66-70.]
- [39] Lubczynski M, Roy J. MRS contribution to hydrogeological system parameterization. *Near Surface Geophysics*, 2005, 3: 131-139.
- [40] Shao Y. To explore the application of NMR technology in coal mine goaf and karst water search. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2008, 35(1): 64-66. [邵雁. 核磁共振技术应用于煤矿中查找老窖及岩溶水害的探讨. 矿业安全与环保, 2008, 35(1): 64-66.]
- [41] Walsh DO. Multi-channel surface NMR instrumentation and software for 1D/2D groundwater investigations. *Journal of Applied Geophysics*, 2008, 66: 140-150. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2008.03.006.
- [42] Wei XJ *et al* eds. Material constituents, depositional features and formation conditions of potassium-rich Salt Lakes in western Qaidam Basin. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 1. [魏新俊等. 柴达木盆地西部富钾盐湖物质组分、沉积特征及形成条件研究. 北京: 地质出版社, 1993: 1.]