

doi: 10.11720/wtyht.2021.0005

何胜, 马文鑫, 甘斌. 地面核磁共振法与高密度电阻率法在西藏盐湖卤水钾矿勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2021, 45(6): 1409–1415. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.0005>

doi.org/10.11720/wtyht.2021.0005

He S, Ma W X, Gan B. Joint application of surface nuclear magnetic resonance and high-density resistivity method in the exploration of potassium ore in salt lake brine in Tibet[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(6): 1409–1415. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.0005>

地面核磁共振法与高密度电阻率法在西藏盐湖卤水钾矿勘查中的应用

何胜^{1,2,3,4}, 马文鑫^{3,4}, 甘斌^{1,2}

(1. 青海省环境地质勘查局, 青海 西宁 810008; 2. 青海省环境地质重点实验室, 青海 西宁 810008; 3. 青海九零六工程勘察设计院, 青海 西宁 810008; 4. 青海省地质环境调查院, 青海 西宁 810008)

摘要: 地面核磁共振法可直接寻找地下水(卤水), 高密度电阻率法在判断卤水与淡水方面较为适用。应用上述两种物探方法在西藏扎仓茶卡盐湖和茶里错盐湖进行了联合探测, 查明了研究区地下卤水的分布情况, 避免了单一方法的局限性和片面性, 为西藏两大盐湖卤水钾矿的勘查开发总体布局提供了依据。同时, 结合地质浅井资料进行了对比分析, 发现两种物探方法联合探测的结果与浅井资料较为吻合, 表明应用上述两种物探方法可为西藏地区的地下水探测提供一种高效、精准的勘探模式。

关键词: 核磁共振; 高密度电阻率法; 盐湖; 卤水;

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2021)06-1409-07

0 引言

我国青藏高原分布有众多盐湖, 其中在西藏地区面积大于 1 km² 的盐湖有 234 个, 绝大多数集中在藏北地区, 仅阿里地区(7 县)就有 100 多个, 该地区盐湖平均海拔大于 4 000 m, 最高海拔大于 5 100 m^[1]。西藏北部高原有着独特的地质构造条件和自然地理环境, 尤其是众多的内陆封闭湖盆, 凭借第四纪以来持续交替的干—湿气候和充足的物质来源与优越的物理化学环境等有利条件, 为星罗棋布的高原盐湖的形成与演化打下重要基础, 特别是硼、锂、钾盐湖及其盐类资源的大量形成和沉积^[2], 不仅为本区自然资源增添了宝贵的财富, 在我国现代内陆盐湖中也具有明显的优势和特色, 其盐湖硼、锂资源储量之多、含量之丰富, 在世界同类盐湖中亦是罕见。长期以来, 由于西藏高寒缺氧及交通条件的限制, 西藏盐湖的地质工作程度较为薄弱, 众多盐湖仅完成了区域性勘探, 且西藏盐湖的勘查工作较为分

散, 未能突出重点, 缺少总体规划和布局。

盐湖勘查通常将沉积盆地沉降中心和蒸发浓缩中心确定为富卤水的找矿靶区, 即寻找沉降中心较厚的晶间含水层^[3]。卤水与普通地下水一样都是以流体的形式存在于地下岩石中, 地层中含有卤水与不含卤水的地层反映出不同的地球物理性质^[4]。高密度电阻率法是利用地层的导电性差异来探测地下水的一种地球物理方法, 该方法对岩层的含水情况特别敏感, 若岩层含地下卤水(或地下淡水、咸水), 则其视电阻率明显降低。这种方法图像直观、清晰, 是一种分辨率较高的物探方法, 但是, 也与其他物探方法一样, 反演结果具有多解性。新近发展的地面核磁共振法(SNMR), 是目前行之有效的直接探测地下水体的物探方法^[5-6], 将其与高密度电阻率法相结合, 做到优势互补, 可获得更加全面准确的地下卤水埋藏信息。本次这两种物探方法在西藏阿里地区革吉县的扎仓茶卡盐湖和茶里错盐湖进行探测, 目的是查明两大盐湖晶间卤水、孔隙卤水含水层的富水性及埋藏深度和厚度, 划分富卤水(矿)区

收稿日期: 2021-01-04; 修回日期: 2021-06-09

基金项目: 西藏自治区地质矿产勘查开发局科研项目“西藏盐湖工作程度及潜力研究”(藏矿勘[2019]32 号)

第一作者: 何胜(1988-), 男, 物化探工程师, 本科, 长期从事水文、工程、地热等方面的物探勘查与研究工作。Email: 395579229@qq.com

段,为西藏扎仓茶卡盐湖和茶里错盐湖的勘查开发总体布局提供数据支撑。

1 地质概况及地球物理特征

1.1 地质概况

研究区内出露的地层主要为第四系地层,分布于现代湖盆边缘及各大小流域和山间盆地中,可划分出冲积、湖积、沼泽沉积、化学沉积及风积等 5 种成因类型。出露海拔相对较低,一般高出当地侵蚀面 0~100 m,其中以冲洪积、湖积分布最广。

扎仓茶卡盐湖所处湖盆为第四纪更新世时期东西相连的古湖泊,赋矿层位为第四系全新统湖相化学沉积。该盐湖东西长 32 km,南北宽 3~6 km,表卤水总面积为 132.5 km²,由 3 个湖泊组成,湖水深 0.15~1.20 m,湖面海拔 4 347 m,属硫酸镁型盐湖,pH 为 9.3,是一个综合盐类沉积矿床。液体矿有硼、锂、钾等盐类,其中以硼酸盐最具特色,构成固液相两种硼矿类型。富矿体 B₂O₃ 平均品位 26.63%,矿体品位稳定。

茶里错湖盆盐类沉积矿物以全新世晚期沉积为主,局部沿现代湖泊两岸的湖滨地带展布,东西宽 2.2~6.1 km,南北长 14.9 km,表卤水面积为 55.18 km²,湖水平均深度 1.99 m,湖面海拔 4 577 m。该盐湖无色、味极咸微涩;pH 为 8.7,密度 1.025 g/cm³。该湖四周化学沉积发育,卤水矿主要有硼、锂、钾等盐类,据浅坑揭露,部分盐样硼达到最低工业品位,为固液并存的盐湖矿床。湖盆有不同程度盐类矿化显示,呈现为灰白色粒状晶体。地表 B₂O₃ 单样最高品位 26.012%,最低 1.716%。

1.2 地球物理特征

卤水是富含以硼、锂、钾盐为主的溶液或饱和溶液,属于强电解质、离子导电,导电离子浓度越大,矿化度越高,电阻率则越低。图 1 给出了溶液电阻率与其矿化度的关系:相同岩性矿化度由 0.5 g/L 增加 20 倍至 10 g/L 时,其电阻率值减小为原来的 1/20,矿化度高则电阻率相对低值、矿化度低则电阻率相对高值^[7-8]。因此,电阻率越低处,赋存高矿化度卤水的可能性就越大。

根据收集的物性、地质资料,扎仓茶卡视电阻率值普遍较低,茶里错视电阻率值普遍较高。在扎仓茶卡盐湖最低阻为含卤水的淤泥和粉砂($\rho=0.5\sim2\ \Omega\cdot\text{m}$),芒硝和含砾粉砂黏土呈现出相对中高阻;茶里错盐湖最高阻层为砂卵砾石层,其值为 200~500 $\Omega\cdot\text{m}$,淤泥和粉砂层为该区最低阻层,其值为 20~

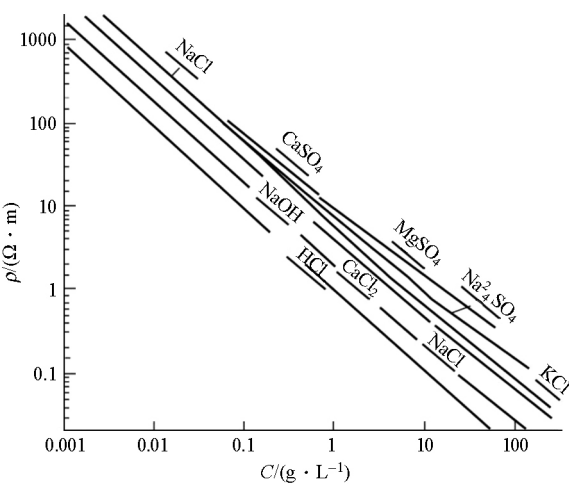


图 1 各种溶液的电阻率与其矿化程度的关系
(根据 B.H.达赫诺夫)

Fig.1 The relationship between resistivity of various solutions and their mineralization degree
(according to B.H. Dakhonov)

90 $\Omega\cdot\text{m}$,该区最低值依然大于扎仓茶卡盐湖最高值,差异极为明显。每个区内探测的目标层电阻率也存在明显差异。因此,采用高密度电阻率法进行探测卤水富水层具有较好的物性前提,再配合地面核磁共振法(SNMR),就能准确地定位富卤水层段。

2 工作及方法布置

2.1 基本原理

SNMR 找水方法的原理是基于研究地下水中氢核弛豫特性的差异形成的核磁共振效应。SNMR 找水方法就是通过观测外加磁场去掉后,氢核在向激发状态恢复的过程中旋进产生的交变磁场在接收线圈中引起电动势的变化来研究地下岩层的含水性(图 2),其中接收的自由衰减信号的初始振幅值的大小与水中质子的水量有关。通常在 SNMR 方法

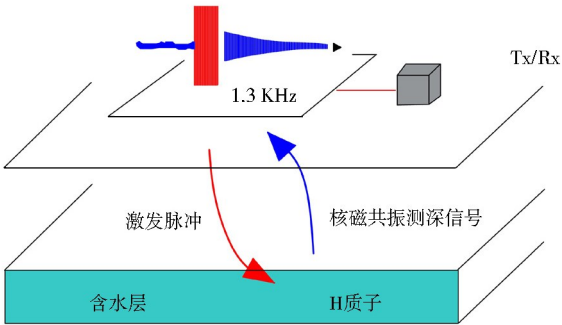


图 2 SNMR 找水工作原理

Fig.2 The working principle of SNMR water

探测深度范围内,在信噪比适宜的情况下,地层中有自由水存在就有核磁共振信号响应,含水量越大响应越强。卤水矿是液体矿的一种,基于上述工作原理,SNMR 成为了一种勘查卤水钾矿的新技术方法^[9-11]。

高密度电阻率法是以岩土体导电性差异为基础,观测和研究人工电场的分布规律,进而确定地下介质相关信息的一种阵列电探方法,其物理前提是地下介质间的导电性差异。工作时,通过 A、B 电极向地下供电流 I,然后在 M、N 电极间测量电位差 ΔU_{MN} (图 3),通过 $\rho_s = K\Delta U_{MN}/I$ (K 为装置系数)求得 M、N 电极间的视电阻率。根据实测的视电阻率剖面进行计算分析,可以获得地下地层中的电阻率分布情况,进而进行地层划分、异常判定^[12-13]。

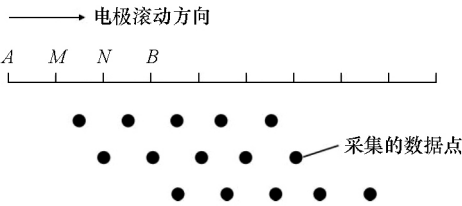


图 3 高密度电法电极排列示意

Fig.3 Schematic view of electrode arrangement in high-density electrical method

2.2 工作布置

在革吉县扎仓茶卡盐湖以 56°方位布置 1 条点

距 5 m 的高密度电阻率法剖面(1 剖面),剖面总长 590 m。根据该剖面探测成果,在 1 剖面 380 m 处布置了 1 个地面核磁共振测点(图 4)。

在革吉县茶里错盐湖东南角分别以 104°、88°方位布置了 2 条点距 5 m 的高密度电阻率法剖面(2 剖面、3 剖面),剖面长度分别为 890、510 m。根据剖面探测成果,在 2 剖面 240 m 处和 3 剖面 180 m 处各布置了 1 个地面核磁共振测点(图 5),用以查明高密度电法推断异常位置地下水的富贫情况。

3 资料解释及成果验证

3.1 资料解释分析

高密度电法数据在剔除原始数据中电阻率为负值或突变点后,基于 RES2DINV 反演软件采用最小二乘法进行反演,利用 Surfer 软件成图,得到反演电阻率断面。地面核磁共振法在资料反演之前,根据高密度电法测量结果,计算形成一个矩阵,用吉洪诺夫正则化的经典最小二乘反演方法,对于每个 SNMR 测点的一组 NMR 信号实测数据由计算机自动地确定一个解,根据反演结果最终利用 CAD 成图解释。

1 剖面高密度电阻率法二维反演电阻率断面图(图 6)显示,电阻率等值线纵、横向差异都较明显,且电阻率值整体较低,为其地层岩性富含地下卤水

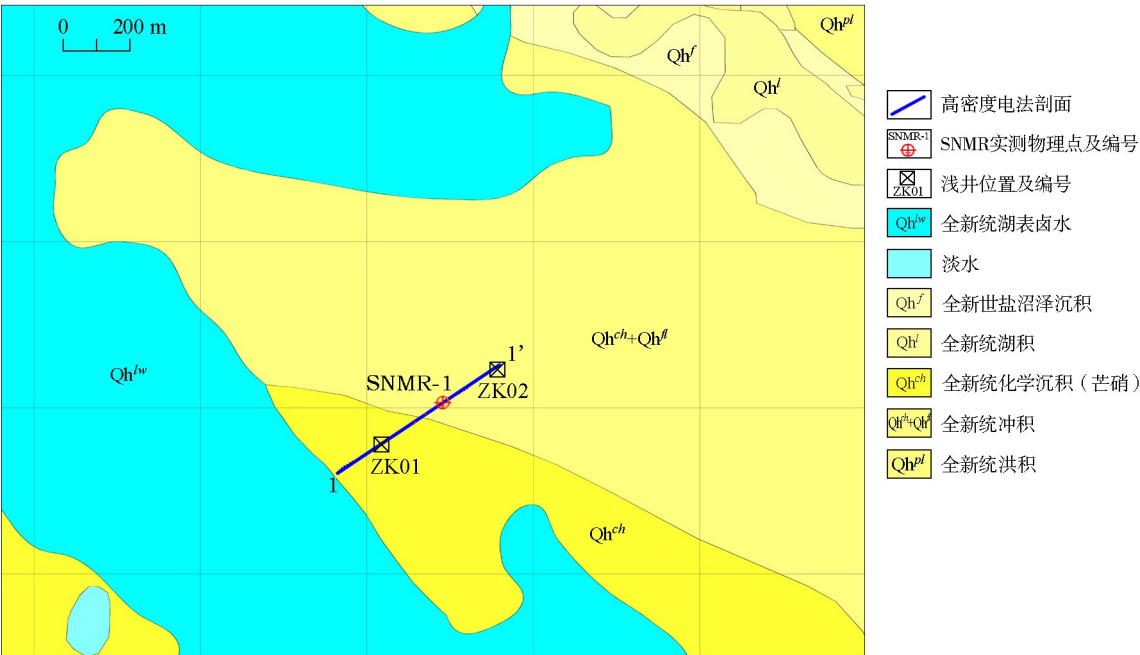


图 4 扎仓茶卡盐湖工作布置示意

Fig.4 Working layout of Zhacangchaka salt lake

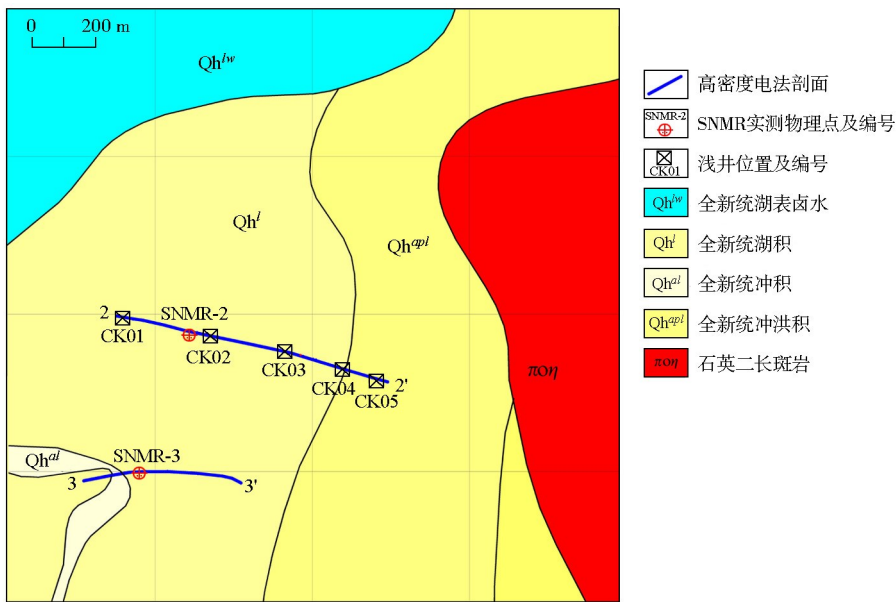


图 5 茶里错盐湖工作布置示意

Fig.5 Working layout of Chalicuo salt lake

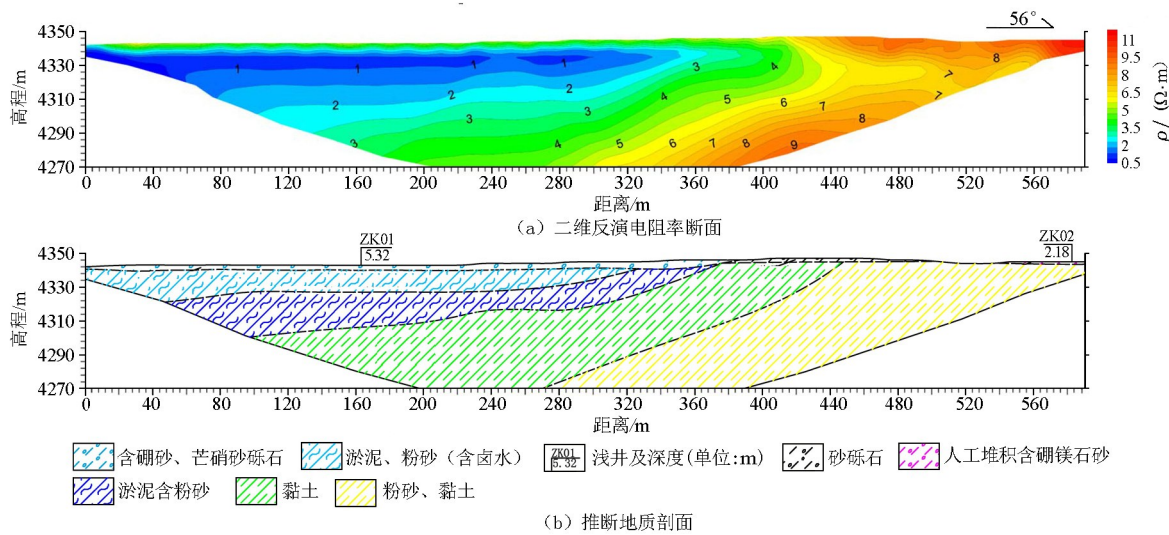


图 6 高密度电法 1 剖面综合成果

Fig.6 Comprehensive result map of electrical resistivity imaging 1 Section

之反映。在剖面距 0~380 m 之间电阻率纵向差异明显,呈“H”型电性特征,其表层 0~3 m 电阻率高于中间层,推测含硼砂、芒硝砂砾石,其下部电阻率值逐渐降低,并为该区最低值。结合地面核磁共振法 (SNMR) 1 号点探测结果 (图 7a) 分析,在 5.0 m 以深视纵向弛豫时间较低 ($T_1^* = 50$ ms),说明该套地层渗透性较差、泥质含量较高;在 0.5~5.0 m 之间视纵向弛豫时间较高 ($T_1^* > 300$ ms),故推测表层富含一定的自由水 (卤水),中间层为富含一定卤水的淤泥、粉砂层。通过 SNMR1 号点的单位体积含水直方图 (图 7b) 可知,该区中深部富含一定的结合水,但水量不大。在剖面距 450~590 m 之间视电阻率等值线较为平缓,电阻率差异较小 ($\rho = 5 \sim 12 \Omega \cdot$

m),整体电阻率值不高,但为该剖面的最高值,推测该段为粉砂、黏土,不含卤水矿。

综上所述,在革吉县扎仓茶卡盐湖物探工区范围内卤水矿含量较少。以高密度电阻率法 1 剖面 380 m 为界,西南侧富水性相对好于东北侧,但其核磁共振探测结果显示卤水层较薄,故该盐湖卤水矿较为一般。

从 2 剖面断面图 (图 8) 可知,电阻率等值线纵向差异都较明显,横向差异相对较小,具层状结构,且电阻率值整体较高,从而推测整体剖面位置不含卤水矿。在剖面距 660~890 m 之间表层至深部均出现低阻异常,大部分集中在 $50 \Omega \cdot \text{m}$ 左右,通过地表地质出露情况,推测该段主要为淤泥、粉砂组

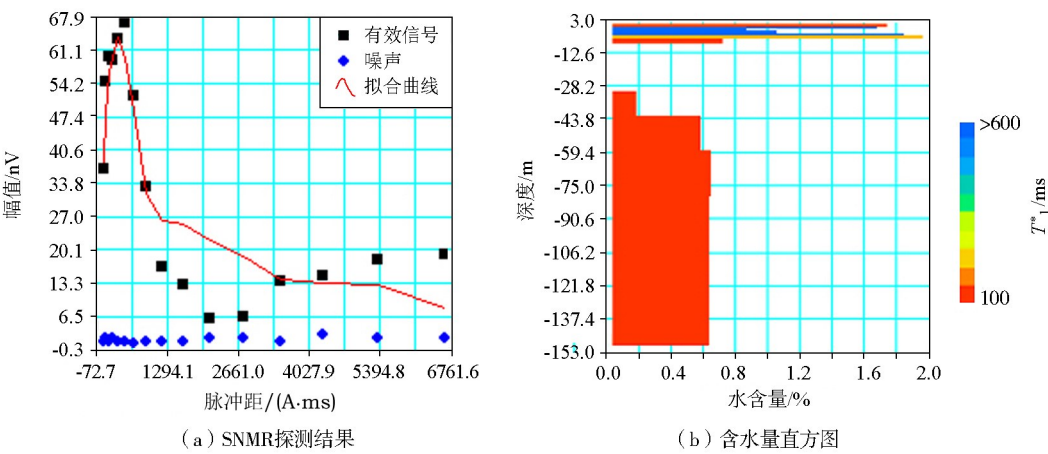


图7 地面核磁共振法(SNMR)1号点综合成果
Fig.7 Comprehensive result map of SNMR site 1

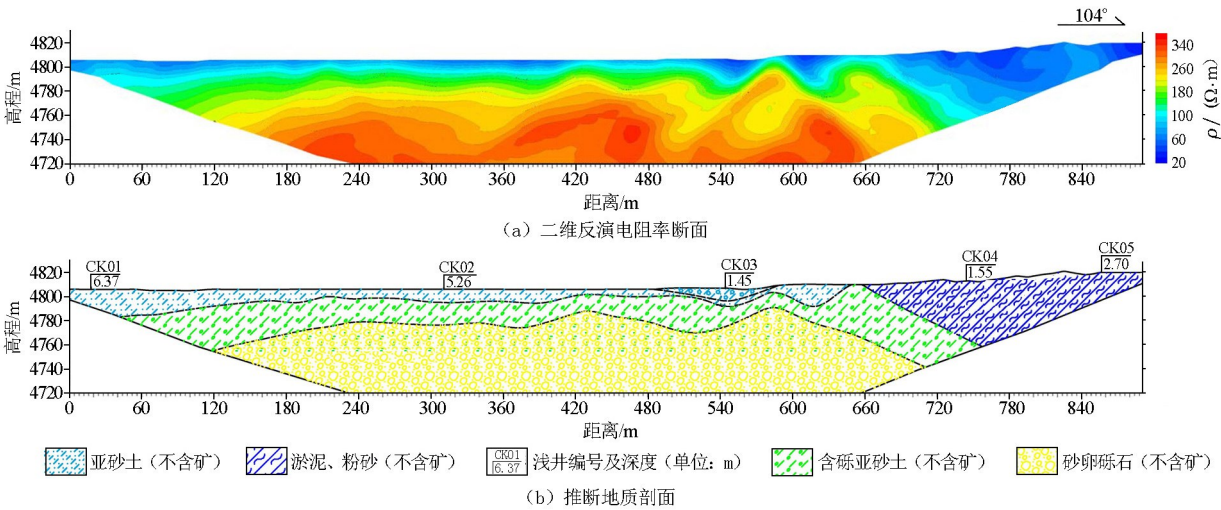


图8 高密度电法2剖面综合成果
Fig.8 Comprehensive result map of electrical resistivity imaging 2 Section

在成。490~580 m 之间表层电阻率较低,结合地面及浅坑资料,推测该处为砂砾石、亚砂土层且富水性较好,导致该处电阻率值偏低。在剖面距 0~650 m 之间电阻率纵向差异明显,呈“A”型电性特征,表层至埋深 4~20 m 电阻率值相对最低,推测为亚砂土,其下部电阻率值逐渐增大,推测为含砾亚砂土;在底部(埋深 20~50 m)电阻率值相对最高,再结合地面核磁共振法(SNMR)2号点探测结果(图 9a),其深部视纵向弛豫时间较高($T_1^* > 600$ ms),单位体积含水率较低,说明该套地层渗透性较好,泥质含量较低,颗粒较粗,故推测其为第四系砂卵砾石层,含水量较少。纵观整条剖面并未出现“H”型曲线,结合地质浅井,故推测该处冻土层较薄。

在 2 剖面南侧 450 m 处,布置了高密度电法 3 剖面和 SNMR-3 号测点。测量结果显示电阻率值整

体较高(基本与高密度电法 2 剖面相似),且 SNMR 法测量结果也基本一致,从而推测在革吉县茶里错盐湖研究区范围内不含卤水矿;2 条高密度电阻率法剖面成果图电阻率值均较高,2 个地面核磁共振法(SNMR)探测成果视纵向弛豫时间均较高($T_1^* > 600$ ms),单位体积含水率深部低、表层高,表明该区主要富水地段在浅部,且均为淡水或咸水。

3.2 成果验证

为了更好地研究上述两大盐湖的开发前景并验证物探成果,在扎仓茶卡盐湖布置了 2 个地质浅井、茶里错盐湖布置了 5 个地质浅井,浅井资料(表 1)显示物探推测成果基本与其吻合。综合研究表明:在革吉县扎仓茶卡盐湖研究区范围内卤水矿含量较少,该盐湖地下卤水开发潜力较为一般;革吉县茶里错盐湖研究区范围内不含卤水矿,地下卤水不具备开发潜力。

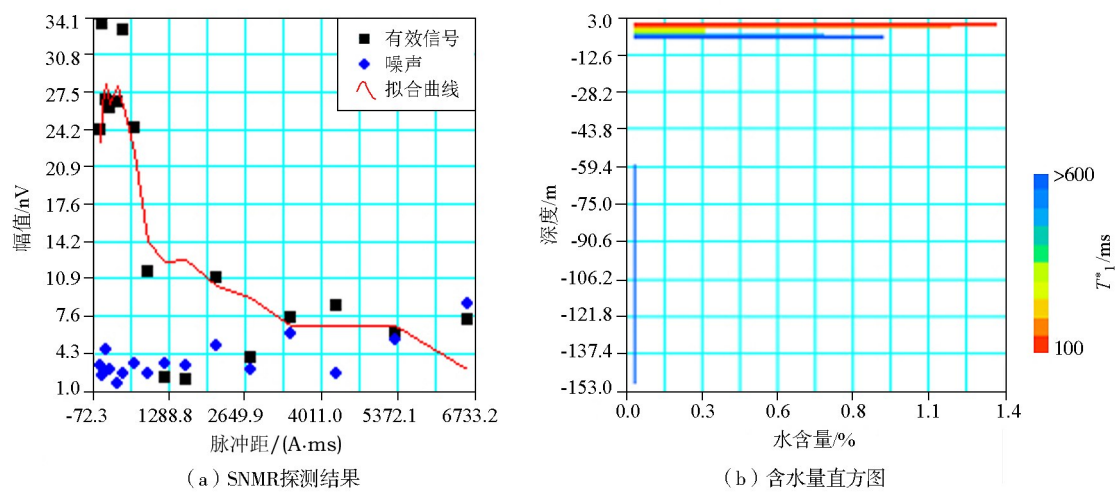


图 9 地面核磁共振法 (SNMR) 2 号点综合成果
Fig.9 Comprehensive result map of SNMR site 2

表 1 研究区地质浅井资料统计

Table 1 Statistical table of geological shallow well data in study area

盐湖	浅井编号	岩性	结果
扎仓茶卡盐湖	ZK01	0~1.35 m, 砂砾层; 1.35~2.13 m, 硼砂、芒硝层; 2.13~5.32 m, 淤泥、粉砂层	晶间卤水; KCl, 27 799 mg/L; LiCl, 3 583 mg/L; B ₂ O ₃ , 2 193 mg/L
	ZK02	0~1.5 m, 人工堆积含硼镁石砂层; 1.5~1.95 m, 黏土质砂层; 1.95~2.18 m, 淤泥层	未达到边界品位
茶里错盐湖	CK01	0~0.21 m, 含盐类亚砂土层; 0.21~1.23 m, 砂质黏土与腐殖土互层; 1.23~2.02 m, 淤泥层、冻土层; 2.02~6.37 m, 亚砂土	未达到边界品位
	CK02	0~0.18 m, 含盐类亚砂土层; 0.18~1.65 m, 砂质黏土与腐殖土互层; 1.65~2.24 m, 淤泥层、冻土层; 2.24~5.26 m, 亚砂土	未达到边界品位
	CK03	0~1.45 m, 砾砂层	未达到边界品位
	CK04	0~0.97 m, 淤泥质粉砂层; 0.97~1.55 m, 淤泥层	未达到边界品位
	CK05	0~0.35 m, 含盐类砂质黏土; 0.35~2.70 m, 砂质黏土与腐殖土互层	未达到边界品位

4 结论

基于研究区地质特征,采用地面核磁共振法与高密度电法相结合的物探手段,查明了研究区地下卤水分布情况,为西藏扎仓茶卡盐湖和茶里错盐湖的勘查开发总体布局提供了依据。通过地质浅井对比验证,表明基于 SNMR 与高密度电法联合勘探较为准确地揭示了研究区地下卤水分布范围,体现了上述两种物探方法优势互补的特点,避免了单一方法的局限性和片面性,为探测地下卤水提供了一种高效、精准的勘探模式。

参考文献 (References):

[1] 李武,董亚萍.西藏盐湖卤水成盐过程自然能的应用[J].科技导报,2017,35(12):39-43.

Li W, Dong Y P. Application of natural energy in salt precipitation from Tibetan salt lakes [J]. Science & Technology Review, 2017, 35(12): 39-43.

[2] 刘喜方,郑绵平.西藏盐湖的钾盐资源[J].科技导报,2017,35(12):62-66.

Liu X F, Zheng M P. Saline lake potash resources in Tibet [J]. Science & Technology Review, 2017, 35(12): 62-66.

[3] 焦鹏程,张建伟,姚佛军,等.马海盐湖深部卤水钾盐勘查与研究进展[J].矿床地质,2016,35(6):1305-1308.

Jiao P C, Zhang J W, Yao F J, et al. Exploration and research progress of potash in deep brine of Mahai salt Lake [J]. Mineral Deposits, 2016, 35(6): 1305-1308.

[4] 黄华,刘成林,张士万,等.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[J].矿床地质,2014,33(5):1101-1107.

Huang H, Liu C L, Zhang S W, et al. Application of geophysical detection method to exploration of deep potassium-rich brine formation: A case study of Jiangling Depression [J]. Mineral Deposits, 2014, 33(5): 1101-1107.

[5] 潘剑伟,占嘉诚,洪涛,等.地面核磁共振方法和高密度电阻率法联合找水[J].地质科技情报,2018,37(3):253-262.
Pan J W, Zhan J C, Hong T, et al. Combined use of surface nuclear magnetic resonance and electrical resistivity imaging in detecting groundwater [J]. Geological Science and Technology Information, 2018, 37(3): 253-262.

[6] 李宏恩,徐海峰,李铮,等.地面核磁共振法与高密度电法联合探测堤坝渗漏隐患原位试验研究[J].地球物理学进展,2019,34(4):1627-1634.
Li H E, Xu H F, Li Z, et al. In situ experimental study on resistivity-magnetic resonance sounding coupling imaging diagnosis method for an embankment dam with seepage defects [J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(4): 1627-1634.

[7] 高敬语,谭嘉言,朱占升,等.音频大地电磁法在地下水水质评价中的应用[J].物探与化探,2013,37(5):895-898.
Gao J Y, Tan J Y, Zhu Z S, et al. The application of the audio magnetotelluric method to the assessment of underground water quality [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(5): 895-898.

[8] 陈松,刘磊,刘怀庆,等.北部湾咸淡水分界面划分中的电法应用分析[J].地球物理学进展,2019,34(4):1592-1599.
Chen S, Liu L, Liu H Q, et al. Application analysis of electrical method in dividing saltwater and freshwater interface in Beibu bay [J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(4): 1592-1599.

[9] 龙作元,何胜.核磁共振测深方法在多年冻土区找水中的应用[J].物探与化探,2015,39(2):288-291.
Long Z Y, He S. Application of nuclear magnetic resonance sounding method in finding water in permafrost regions [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(2): 288-291.

[10] 刘军.地面核磁共振与瞬变电磁联合探测技术在矿区老空水探测中的应用[J].建井技术,2016,37(6):16-18.
Liu J. Surface ground nuclear magnetic resonance and transient electromagnetic combined detection technology applied to detection of water in goaf of mining area [J]. Mine Construction Technology, 2016, 37(6): 16-18.

[11] 何胜,蒋厚辉,裴有全,等.核磁共振测深方法在盐湖区卤水钾矿勘查中的应用[J].地球物理学进展,2015,30(1):332-338.
He S, Jiang H H, Chang Y Q, et al. Application of MRS method in exploration brine potassium ore in saline lake district [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(1): 332-338.

[12] 王瑞丰,温来福,程久龙,等.高密度电法与瞬变电磁法联合勘查河北承德地区基岩裂隙水[J].地球科学与环境学报,2020,42(6):784-790.
Wang R F, Wen L F, Cheng J L, et al. Joint detection of bedrock fissure water using high-density electrical method and transient electromagnetic method in Chende Area of Hebei China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2020, 42(6): 784-790.

[13] 许艺煌,黄真萍,程志伟,等.高密度电阻率法在弃渣堆积体分布调查中的应用[J].物探与化探,2020,44(2):435-440.
Xu Y H, Huang Z P, Cheng Z W, et al. The application of high density electrical resistivity method to the investigation of the distribution of slag accumulation in hydropower station [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(2): 435-440.

Joint application of surface nuclear magnetic resonance and high-density resistivity method in the exploration of potassium ore in salt lake brine in Tibet

HE Sheng^{1,2,3,4}, MA Wen-Xin^{3,4}, GAN Bin^{1,2}

(1. Qinghai Bureau of Environmental Geological Exploration, Xining 810008, China; 2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Environment and Geology, Xining 810008, China; 3. Qinghai 906 Engineering Survey and Design Institute, Xining 810008, China; 4. Qinghai Institute of Geology and Environment, Xining 810008, China)

Abstract: Surface nuclear magnetic resonance (SNMR) can be used to directly find groundwater (brine), and the high-density resistivity method is suitable to distinguish brine from fresh water. This study introduces the joint exploration using the above two geophysical methods in two major salt lake study areas in Tibet-Chagcam Caka and Chalico salt lakes, in order to make full use of the advantages of the two methods while avoiding the limitations and one sidedness of a single method. As a result, the distribution of underground brine in the two salt lakes was identified, thus providing a basis for the overall layout of the exploration and development of potassium ore in brine in the two salt lakes. Furthermore, the joint exploration results of the two geophysical methods were highly consistent with the geological survey results of shallow wells. It can be concluded that the joint application of the above two geophysical methods in Tibet serves as an efficient and accurate exploration mode for the exploration of underground brine.

Key words: surface nuclear magnetic resonance; high-density resistivity method; salt lake; brine

(本文编辑:沈效群)