doi: 10.11720/wtyht.2026.0089
宦毅, 苏金宝, 郑小刚, 等. 四川自贡南部复式褶皱翼部深层卤水勘查实践及其意义[J]. 物探与化探, 2026, 50(4): 644-654. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.0089
Huan Y, Su J B, Zheng X G, et al. Exploration practice and geological implications of deep subsurface brine along the flanks of complex folds in the southern Zigong area, Sichuan[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(4): 644-654. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.0089

四川自贡南部复式褶皱翼部深层卤水勘查实践及其意义

宦毅[1], 苏金宝[1], 郑小刚[2], 崔建军[3], 朱自强[4]
(1. 河海大学 海洋学院, 江苏 南京 210098; 2. 四川省地质矿产(集团)有限公司, 四川 成都 610017; 3. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081; 4. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘 要: 四川自贡地下卤水赋存盐也富集关键金属锂资源, 卤水主要集中于背斜轴部, 经多年开发, 面临资源少、接替难的处境。褶皱翼部深部找卤研究相对较少, 可能具有较大资源潜力。因此选取铁匠沟和向阳湾两个背斜与向斜翼部构造区, 开展了地下深层卤水勘查。通过岩石物性调查与广域电磁勘探, 发现深部存在差异明显的电性特征, 结合地层、构造, 对深部电性结构和低阻异常进行了综合解释。结果表明, 研究区 1 500 m 深度剖面整体表现出明显的"上低下高"电性分带特征, 须家河组下部—雷口坡组上部为较有利的目标层位; 两个研究区均识别出层状、似层状或椭圆状低阻异常, 且与区域探明的黄卤赋存层位对应较好。铁匠沟钻探结果进一步验证了异常解释的可靠性。研究认为, 褶皱翼部同样具备地下卤水富集与保存条件, 是自贡地区深部找卤的重要接替方向, 可为老盐区外围资源勘查和地下卤水赋存规律研究提供新的依据。

关键词: 广域电磁法; 地下深层卤水; 低阻响应; 褶皱翼部
中图分类号: P631.4; P31 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2026)04-0644-11

0 引言

锂是当前能源转型背景下的重要战略金属, 在新能源、航空航天及国防军工等领域具有广泛应用前景[1-2]。我国锂资源储量以卤水型和硬岩型为主, 其中卤水型可分为地表盐湖型卤水和地下深层卤水[3-4], 地表盐湖资源规模和分布相对固定, 难以满足持续增长的资源需求, 锂资源勘查逐步向地下深层卤水拓展[5]。我国地下卤水资源分布广泛, 主要集中于青海柴达木盆地、四川盆地、江西吉泰盆地以及湖北江汉盆地等地区[6]。前人研究表明, 地下卤水属于层控型地下流体矿产, 其赋存与富集受沉积条件、储集空间及构造作用共同控制。其中, 储层岩性控制卤水的储集能力, 构造变形形成的裂隙系统则为卤水运移和富集提供通道[7-14]。基于此, 前人研究提出了"盐盆控卤、孔缝储卤、构造定带"的富集模式[15]。在构造控卤认识方面, 已有研究多强调背斜圈闭构造对地下卤水富集的控制作用, 认为背斜轴部应力集中、断裂和裂隙较发育, 是有利的赋卤部位[16], 并在实际勘查中形成了"一占三沿"(占构造高点、沿轴线、扭曲、陡带)的布井原则; 自贡地区既有钻井部署也多集中于背斜轴部及断裂发育带。然而, 同样有研究指出地下卤水的富集与保存并不完全受强构造部位单一控制, 构造相对缓和区如背斜或向斜的翼部同样值得关注[17-18]。

深部地下卤水长期赋存于埋深较大的封闭—半封闭地质体系中, 基本不参与现代水循环, 属于典型

收稿日期: 2026-04-09; **修回日期**: 2026-05-14
基金项目: 国家重点研发计划项目"混场源多参数航空电磁勘探系统应用示范及查证"(2023YFC2907105); 国家自然科学基金(42272236)
第一作者: 宦毅(2001-), 男, 硕士研究生, 研究方向为华南构造演化。Email: 241317020002@hhu.edu.cn
通讯作者: 苏金宝 (1980-), 男, 教授, 主要从事构造地质学研究。Email: sujinbao@hhu.edu.cn
朱自强(1984-), 男, 正高级工程师, 从事航空电磁方法技术研究。Email: 344080895@qq.com

的不可更新型地下流体资源[19-20]。以自贡地区为例, 自流井背斜自公元十六世纪至 1990 年累计开采地下卤水约 6.8×10^8 m^3, 可采黄卤资源已基本疏干[20], 黑卤资源在 20 世纪 90 年代初期其水头已降至储卤层顶板以下, 剩余资源量亦有限[21]; 在兴隆场背斜黄卤产区, 1970~1981 年黄卤水位由初始海拔约 290 m 下降至 10 m, 其剩余可采量预测仅可维持至 2036 年前后[22]。长期、高强度开发使自贡地区传统富卤部位资源持续衰减, 多数老井因产能明显下降而停废[23], 单纯依赖既有富卤构造已难以支撑区域盐卤资源的持续开发。受历史时期钻探技术条件和工程能力的制约, 早期勘探与开采活动主要集中于背斜轴部等埋藏较浅的有利部位, 而对向斜这种埋深较大的构造单元钻探控制明显不足, 对深部卤水的可采性及盐类矿产品位特征仍缺乏系统认识与工程验证。由此可见, 在老勘查区开展外围构造单元再评价, 对拓展深部找卤空间, 实现盐卤资源的战略接替与可持续利用具有现实意义。

基于上述认识, 本文选择自贡地区背斜翼部与向斜翼部作为研究对象, 在铁匠沟与向阳湾两个区域开展广域电磁测深工作, 分析地下卤水可能的赋存层位、埋藏深度及其与构造部位的关系, 探讨背斜翼部与向斜翼部对地下卤水富集与保存的控制作用, 以期为自贡地区深部找卤靶区优选提供新的地球物理依据和构造认识。

1　地质背景

自贡地区位于四川盆地南部, 大地构造上位于川中隆起带的自贡凹陷, 地层属上扬子地区四川盆地分区。研究区主要出露地层有侏罗系中—下统自流井组($J_{1\text{-}2}z$), 中统上沙溪庙组(J_2s)、下沙溪庙组(J_2xs)、新田沟组 (J_2xt), 上统遂宁组 (J_3sn)、蓬莱镇组 (J_3p) 和白垩系窝头山组 (K_1w)[24](图 1a)。区域构造以褶曲为主, 由北部的威远背斜和南侧的青山岭背斜以及两个背斜之间的自流井背斜、兴隆场背斜和邓井关背斜组成一个 NE 向的复式褶皱。区内断层以 NW 向为主, NE 向次之。自贡地区是盆地内三叠系含盐地层发育较为典型的地区之一, 也是川南深部盐卤资源富集区, 其储卤构造以自流井背斜、兴隆场背斜、邓井关背斜为代表, 具有卤水规模大、锂含量高、低 Mg/Li 值等优点。储卤范围受背斜圈闭控制, 卤水的富集与运移主要受褶皱裂隙和断裂发育程度控制, 如自流井背斜构造黄葛坡断裂带生产的卤水资源量占到整个构造的 74%[21]。据最新统计, 自流井背斜含锂卤水中 Li^+含量为 45~75 mg/L,累计探明卤水资源量 5.5×10^8 m^3 以上, 其中含锂卤水探明资源量约 1.63×10^8 m^3, 保有资源量 1.50×10^8 m^3; 邓井关背斜黑卤 Li^+平均浓度为 74.7 mg/L, 卤水资源探明资源量 5.975×10^7 m^3, 其中含锂卤水探明资源量 1.566×10^7 m^3, 保有资源量 9.78×10^6 m^3; 兴隆场背斜黑卤中 Li^+平均浓度为 50 mg/L; 兴隆场背斜卤水资源累计探明资源量 1.7×10^8 m^3, 其中含 锂卤水探明资源量 5.751×10^7 m^3, 保有资源量 5.684×10^7 m^3[15]。3 个背斜经过数十至数百年的开发, 剩余卤水虽可供继续开采, 但是仍需要拓展找卤空间, 实现卤水资源可持续发展。

研究区位于兴隆场背斜构造, 其中, 向阳湾区域位于舒平莲花向斜东翼、兴隆场背斜西翼, 铁匠沟区域位于兴隆场背斜南翼(图 1a)。兴隆场背斜为一穹隆状低丘构造, 整体表现为南翼倾角相对较大的不对称背斜形态, 平面上长轴约 13 km、短轴约 7 km, 以沙溪庙组底界作为构造闭合界限, 其闭合面积约为 90 km^2。该背斜核部主要出露新田沟组及下沙溪庙组地层, 而两翼则以出露上沙溪庙组为主。构造北段及中段分别发育 NW 向展布的龙袍山断裂与玉皇庙断裂[15]。该构造卤水及伴生天然气资源丰富, 自 1971~2016 年, 兴隆矿区累计建成卤水及伴生气生产井 15 口, 卤水累计产量约 2.87×10^6 m^3, 天然气累计产量约 1.044×10^7 m^3。随着开采程度的不断加深, 卤水已无法自喷, 气藏压力亦呈逐步衰减趋势[25]。研究区总体上与实际生产中长期青睐的背斜轴部有着不同的构造特征和水文地质条件, 地层较缓, 断裂发育较弱。

2　研究方法

2.1　物性参数

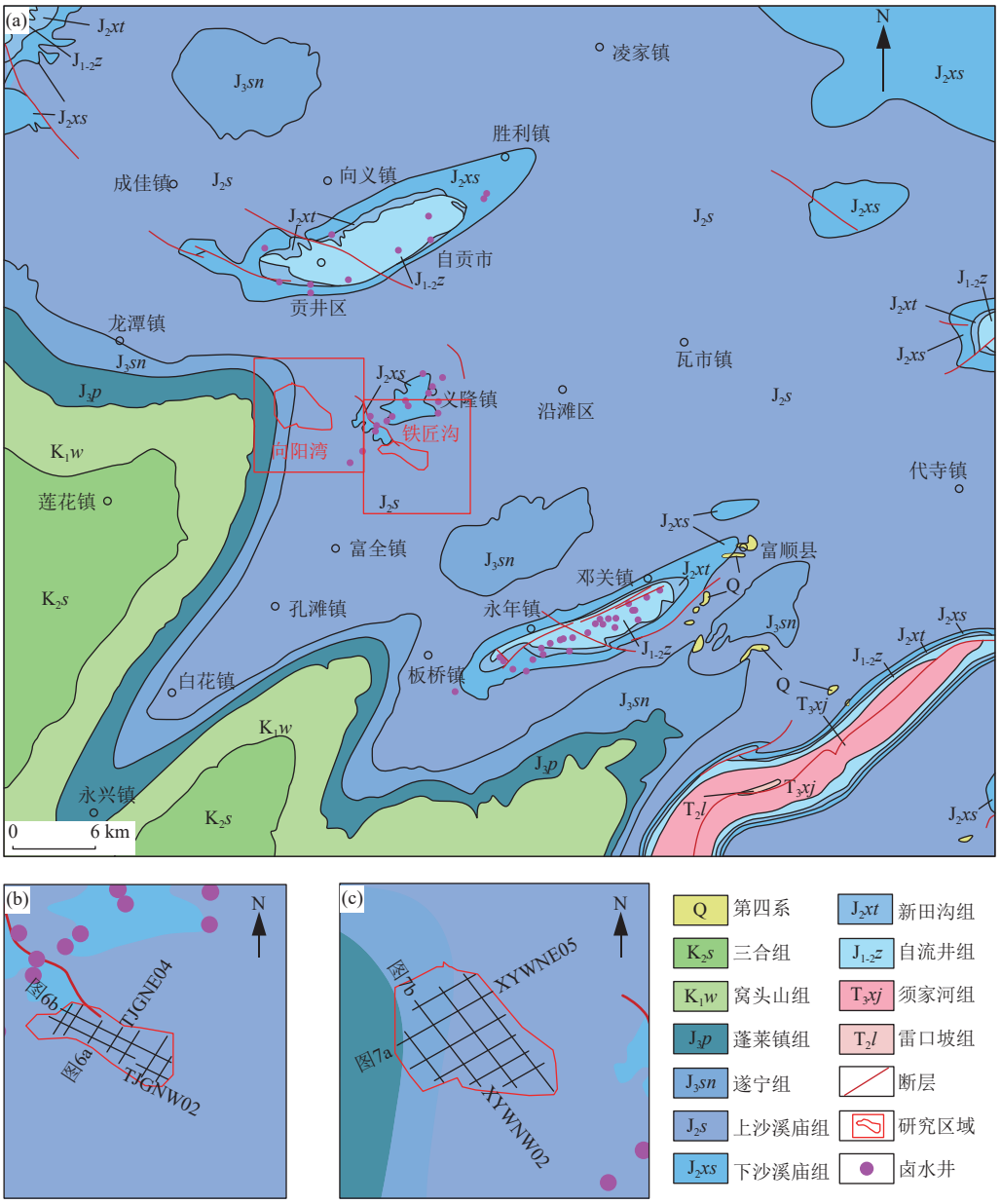
引起电性异常的根本原因是地层岩石的电性差异, 明确研究区地层岩石的电阻率参数是进行电法物探的基本工作之一。本次采用强迫电流法测定岩石标本的电阻率参数(图 2), 使用 LZSD-C 型自动直流数字电测仪, 测量电压与电流。通过电极 *AB* 向岩石标本通入稳定的电流I_{AB}, 测量电极 *MN* 之间的电压差ΔV_{MN}:

$$\Delta V_{MN} = R_{标本}\cdot I_{AB} = \rho\frac{L}{S}\cdot I_{AB}, \qquad (1)$$

根据欧姆定律, 岩石标本的电阻率为:

$$\rho = \frac{\Delta V_{MN}}{I_{AB}}\cdot\frac{S}{L}, \qquad (2)$$

式中: L为电流流过的标本长度; S为电流流过标本



a—区域地质简图; b—铁匠沟区域; c—向阳湾区域

a—simplified regional geological map; b—Tiejiangou area; c—Xiangyangwan area

图 1　自贡地区地质构造简图(据 [26] 修改)

Fig. 1　Schematic geological map of the Zigong area (modified from reference [26])

的截面积。

在自贡市周边系统采集了窝头山组(K_1w)、遂宁组(J_3sn)、蓬莱镇组(J_3p)、上沙溪庙组(J_2s)、下沙溪庙组(J_2xs)、新田沟组(J_2xt)、自流井组($J_{1\text{-}2}z$)、须家河组(T_3xj)、雷口坡组(T_2l)和嘉陵江组(T_1j)不同类型具有代表性的岩(矿)石标本 315 块, 并进行了测试(表 1)。

根据物性样品电阻率统计结果, 结合区域地层岩性和厚度, 对自贡地区地层(段)进行了加权电阻率统计(图 3)。地层电阻率随埋深总体呈“上低下高”的垂向分带: 地层由新到老, 电阻率由低向高过渡。须家河组及其上覆地层与雷口坡组以下地层之间的电性差异较为突出, 物性统计表明, 须家河组及上覆地层中, 自流井组的加权平均电阻率最高, 约 176 Ω·m, 而雷口坡组下部电阻率明显增大, 加权平均值接近 1 000 Ω·m。该上下差异主要受岩性控制: 须家河组及其上覆地层以砂岩、粉砂岩等碎屑岩为主, 电阻率相对偏低; 雷口坡组与嘉陵江组以灰岩、白云岩等碳酸盐岩为主, 电阻率显著偏高。

须家河组及其上覆地层内部的电阻率, 在不同岩性段之间呈现交替变化, 整体为“低—高”相间的垂向特征。按电阻率水平可划分若干物性层: 上沙

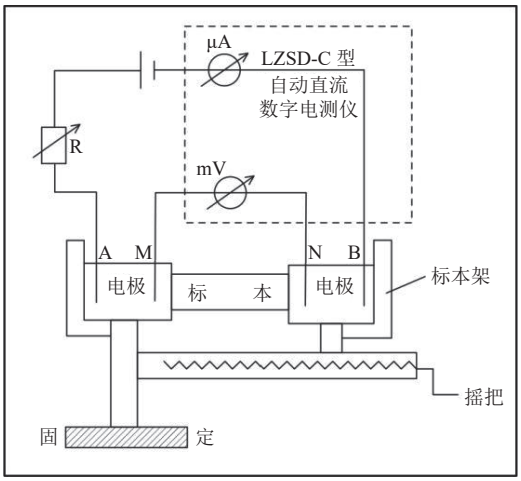


图 2　直流电阻率法电路示意

Fig. 2　Schematic of the DC resistivity measurement circuit

溪庙组、下沙溪庙组与新田沟组平均电阻率分别约 45、65 和 56 Ω·m, 构成上部低阻层; 自流井组、珍珠冲组及须家河组上部(4~6 段)加权平均电阻率均大于 100 Ω·m, 可归为中阻层; 须家河组下部(1~3 段)加权平均电阻率约 88 Ω·m, 较上部降低, 可作为低阻层识别; 雷口坡组及嘉陵江组, 电阻率整体升高, 其中雷口坡组平均电阻率约 993 Ω·m, 接近 1 000 Ω·m, 因此雷口坡组与嘉陵江组可统一归入高阻层。

以往通过测井和地震等方法, 对四川盆地深层卤水的地球物理特征开展了许多研究, 在地球物理响应上, 富钾锂卤水层通常表现为高自然伽马、高声波时差、低密度和低电阻率的特征[27-28], 卤水作为富含离子的强电解质, 其电阻率与矿化度密切相关, 矿化度越高, 电阻率越低, 卤水层电阻率通常较低, 一般小于 100 Ω·m, 部分地区高矿化度卤水可低至 0.2~2.0 Ω·m[29]。

综上, 研究区内不同地层及卤水之间存在较为明显的电性差异, 具备广域电磁法应用条件。

2.2　广域电磁法

广域电磁法是一种主动源频率域电磁测深方法, 场源采用伪随机电流信号, 既能提高抗干扰能力, 也便于一次发射覆盖多个频率信息, 从而提升采集效率。广域视电阻率的计算基于全域严格公式, 推导过程中不依赖远区假设, 也不做会引入精度损

表 1　物性样品统计

Table 1　Statistical of physical property samples

地层	代号	典型岩性	样品数量/个	电阻率/(Ω·m)		
				最小值	最大值	几何平均值
窝头山组	K_1w	细砂岩	8	11	136	33
		砂岩	8	15	168	38
遂宁组	J_3sn	砂岩	6	26	183	41
		粉砂岩	6	19	125	36
		粉砂质泥岩、泥岩	4	13	76	31
蓬莱镇组	J_3p	红色层状细砂岩	12	29	102	39
上沙溪庙组	J_2s	粗砂岩	15	32	165	55
		中砂岩、砂岩	19	26	143	42
		粉砂岩	15	21	132	39
下沙溪庙组	J_2xs	泥岩、泥质粉砂岩	26	16	97	37
		砂岩	10	46	213	78
		泥岩、粉砂质泥岩	13	25	104	59
新田沟组	J_2xt	泥岩、粉砂岩	6	26	86	62
		泥灰岩	4	236	569	312
自流井组	$J_{1-2}z$	灰岩	6	965	2 359	1 568
		砂岩、粉砂岩	20	56	168	126
		泥岩、炭质泥页岩	19	12	109	46
须家河组	T_3xj	石英砂岩	18	96	356	169
		砂岩、粉砂岩	20	56	198	96
		泥岩、炭质泥页岩	20	26	78	46
雷口坡组	T_2l	白云岩	10	1 586	2 385	1869
		灰岩	10	986	1868	1 356
		泥灰岩	12	456	1 262	765
嘉陵江组	T_1j	白云岩	15	1889	2 658	2 153
		灰岩	16	1 029	2 186	1 659

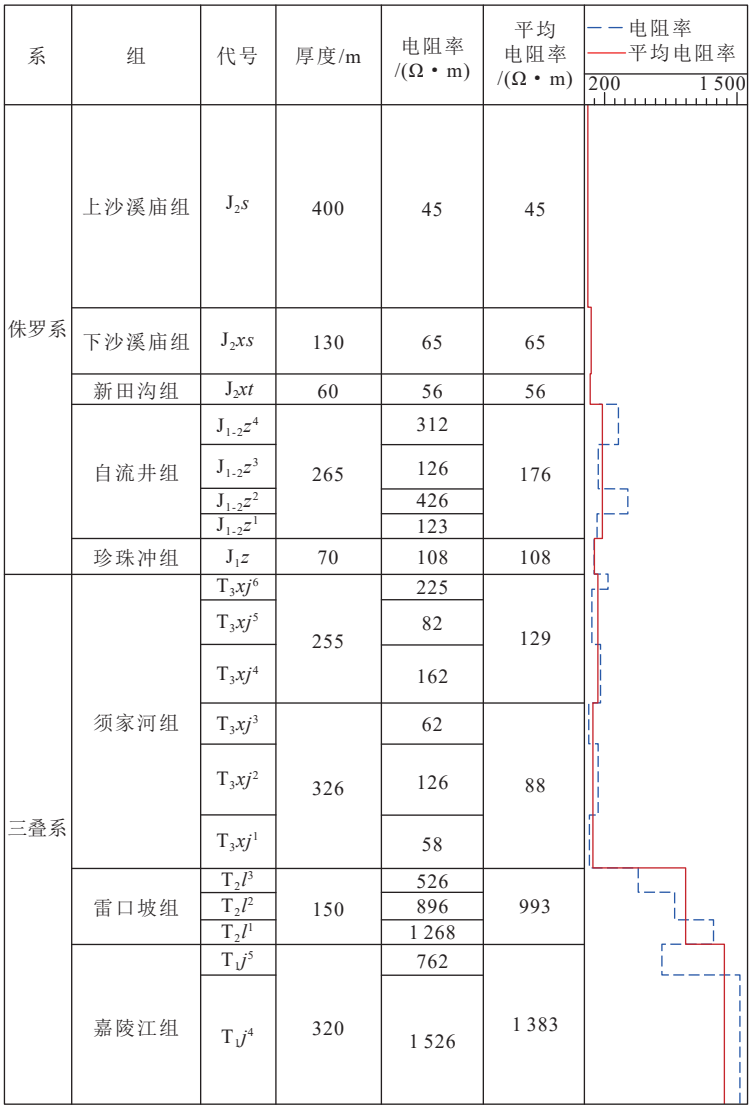


图 3　自贡地区地层综合电阻率垂向变化

Fig. 3　Integrated vertical variation of formation resistivity in the Zigong area

失的近似舍弃, 因此可在近区、过渡区等非远区条件下开展测量。相较于卡尼亚视电阻率, 该视电阻率定义更具普适性与稳定性, 理论上可获得更高的计算精度。实际工作中只需获取电磁场的单一分量, 即可实现视电阻率信息的提取与解释[30-31]。

在广域电磁法中, 以电偶极为场源, 测量电场的 x分量, 会得到均匀大地表面上水平电偶极源E_x的严格精确的数学表达式:

$$E_x = \frac{IdL}{2\pi\sigma r^3}[1-3\sin^2\varphi+\mathrm{e}^{-\mathrm{i}kr}(1+\mathrm{i}kr)], \qquad (3)$$

根据上式可以定义广域意义上的视电阻率:

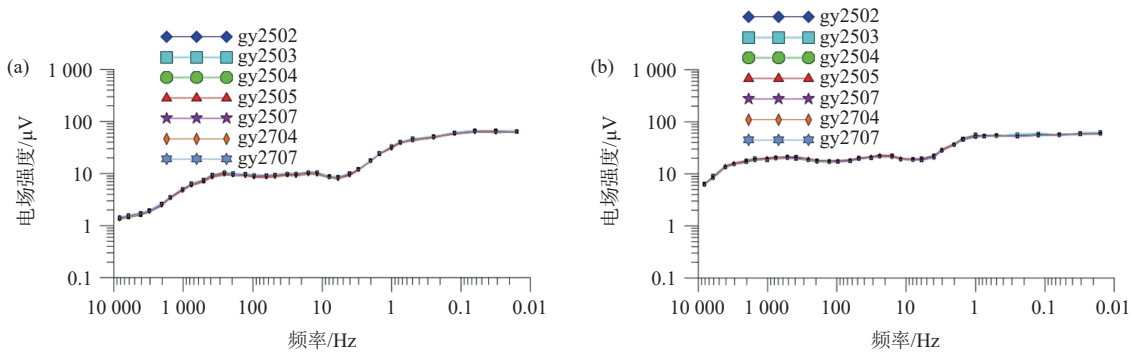
$$\rho_a = K_{E-E_x}\frac{\Delta V_{MN}}{I}\frac{1}{F_{E-E_x}(\mathrm{i}kr)}, \qquad (4)$$

式中: K_{E-E_x}为与观测装置几何尺寸有关的系数; ΔV_{MN}为实际观测电位差, μV; I为发送电流, A; $F_{E-E_x}(\mathrm{i}kr)$为由发送电流频率ω(rad/s)、地下电阻率ρ(Ω·m)、收发距r(m)构成的复合函数。基于不受观察点到场源距离限制的广域视电阻率公式, 利用计算机迭代方法求解视电阻率的最佳值[32]。

在两个研究区域各自部署了 10 条广域电磁测线 (图 1b, 图 1c, 加粗测线为本文中展示剖面), 其中铁匠沟区域 NW 向 3 条, NE 向 7 条; 向阳湾区域 NW 向 4 条, NE 向 6 条。

2.3　技术参数

通过采集参数试验和仪器一致性进行测量分析, 确定本次广域电磁工作极距 25 m, 最大接地电阻 10.8 Ω, 场源距 AB≈1 km, 发射电流最小 59 A, 收发距范围 6~10.3 km, 测量频率范围 0.01～8 192 Hz。对电场强度进行均方相对误差计算, 7 台仪器工前一致性总均方相对误差为 2.20%, 最大均方误差 2.97%; 工后一致性总均方误差 1.97%, 最大均方误差为 2.92%: 一致性试验满足工作要求(图 4)。



a—工前对比; b—工后对比

a—pre-survey comparison; b—post-survey comparison

图 4　仪器一致性对比曲线

Fig. 4　Instrument consistency comparison graph

3　结果

3.1　广域电磁数据处理

本次广域电磁法资料处理与反演解释采用《地球物理资料综合处理解释一体化系统 GME-3DI》完成, 依托其模块化处理流程及重—磁—电综合解释功能, 实现广域电磁数据的统一处理与解释。首先对原始数据进行质量评价, 重点分析各测点、各频点资料的噪声水平、曲线连续性及异常信息可靠性, 对受干扰较强或畸变明显的频点进行剔除、压制与平滑处理; 同时开展静态校正和地形校正, 减弱浅部不均匀体及复杂地表条件对观测结果的影响, 为后续反演提供可靠数据基础。由于各测线资料处理方法一致, 根据研究区典型测线频率—视电阻率曲线形态 (图 5) 以及频率—电阻率断面特征, 定性分析地下电性分布规律, 初步识别地层结构、构造展布及断裂发育特征。可以看出曲线类型以“H”为主, 中低频明显存在一条低阻凹带, 反映了该区低阻层连续存在, 如果凹频率范围较大, 低阻目标层存在的可能性较大, 根据曲线类型变化及凹段的范围可以大体推断构造界限。依据地表出露情况, 结合地层层系和曲线类型, 可以大体推断地层分布情况及构造变化情况。最后, 开展广域电磁资料的一维与二维反演, 将频率—电阻率信息转换为深度—电阻率断面, 并结合已有地质资料、岩石物性参数及钻探认识, 对反演参数与约束条件进行调整和验证, 逐步完成由定性异常分析到定量解释的转换, 提高反演结果的可靠性和地质解释的可信度。

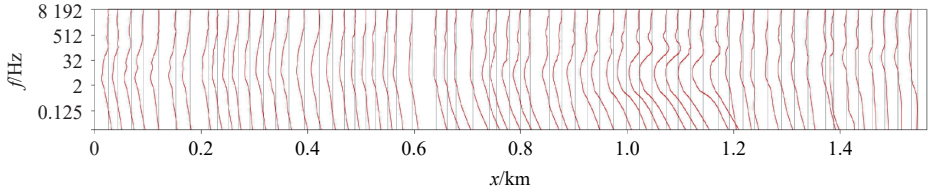


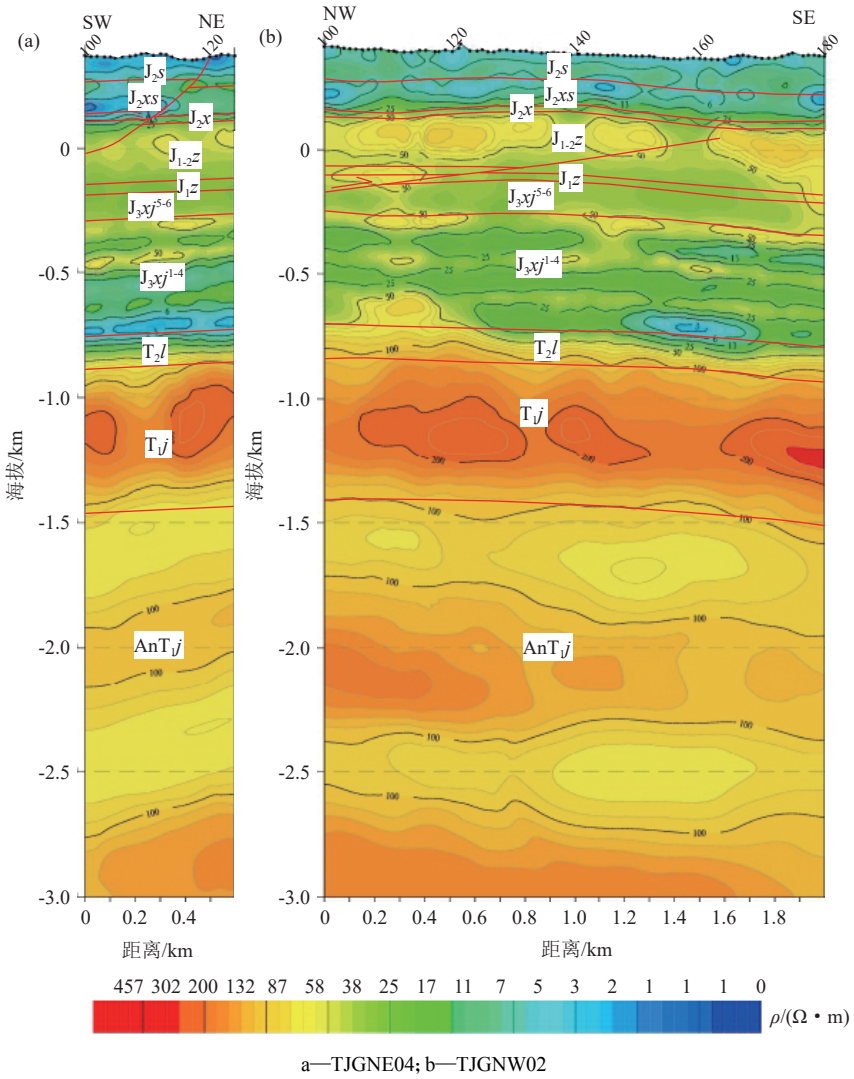
图 5　频率—视电阻率曲线

Fig. 5　Frequency-apparent resistivity curve

3.2　研究区低阻异常的空间展布特征

铁匠沟区域低阻异常主要发育于须家河组下部与雷口坡组上部对应层位, 异常整体以层状或似层状为主, 沿目标层位具有一定连续性(图 6)。以 TJGNE04 剖面综合解释为例, 以海拔 100 m 为界, 海拔 300~100 m 对应上沙溪庙组、下沙溪庙组与新田沟组, 电阻率由地表约 10 Ω·m 过渡到约 25 Ω·m, 整体属于低阻层; 海拔 100~−300 m 电阻率值明显升高, 对应自流井组、珍珠冲组和须家河组 5~6 段, 平均电阻率达到 30~50 Ω·m, 属于中阻层; 海拔−300~−500 m 对应须家河组 4 段, 剖面显示两层状 50 Ω·m 中等电阻带夹一 25 Ω·m 低阻带; 到达须家河组 (1~3)段及雷口坡组上部电阻率值显著降低, 对应海拔−500~−800 m, 反演剖面表现似层状、层状中阻、低阻, 电阻率最低仅 1~13 Ω·m, 为低阻层; 海拔−800 m 以深为雷口坡组下部和嘉陵江组, 总体电阻率升高, 高阻背景平均达到 80 Ω·m, 嘉陵江组出现超 200 Ω·m 的高阻层。

向阳湾区域反演剖面的整体电性形态与铁匠沟相似(图 7), 上沙溪庙组、下沙溪庙组和新田沟组



a—TJGNE04; b—TJGNW02

图 6　铁匠沟区域广域电磁法反演电阻率断面

Fig. 6　Inversion resistivity section of WFEM in the Tiejianggou area

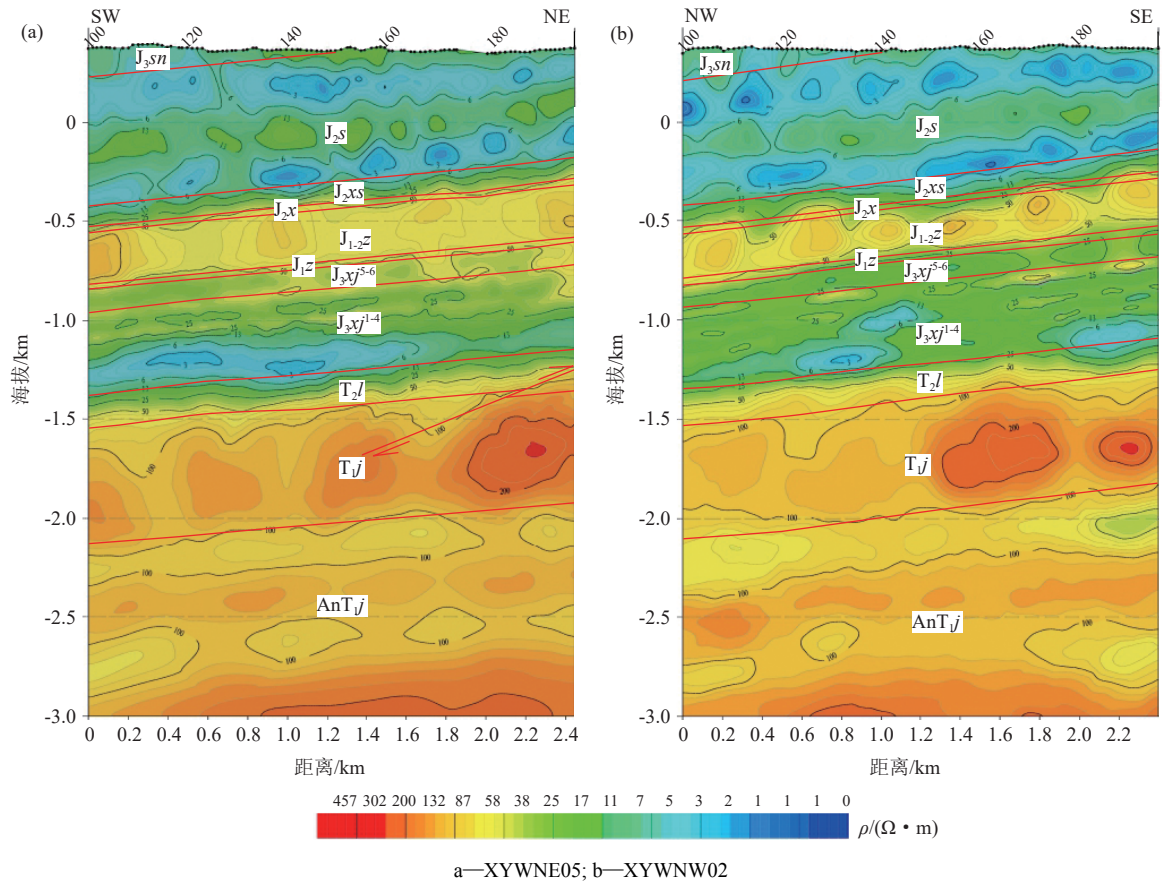
较铁匠沟区域更厚，浅部以低阻为主，最高不超过 15 Ω·m；海拔−500~−1 000 m 电阻值整体升高，达到平均 50 Ω·m，对应自流井组和珍珠冲组，海拔−1 000~−1 400 m 进入须家河组，下部出现大范围似层状低阻异常，对应须家河组(1~3)段；海拔−1 400 m 以深进入雷口坡组，电阻率呈稳定过渡的由低到高变化；进入嘉陵江组，电阻背景显著升高，平均超过 100 Ω·m，出现电阻率超 300 Ω·m 的极大值区域。

总体而言，两个区域广域电磁反演剖面均显示出较稳定的垂向电性分层特征，表现为上部相对低阻、下部相对高阻，主要电性分界与雷口坡组附近层位对应较好。在雷口坡组以上层系内，两个区域反演剖面普遍表现为层状或似层状“低—高”交替的电性组合，雷口坡组下部及其以下地层进入高阻背景。该特征与根据物性结果所统计的地层综合电阻率垂向变化规律基本一致，反映出研究区地层电性结构受岩性组合控制明显。

由此可见，研究区中—深部电性结构在垂向上具有较好的层位可比性，能够为后续异常识别提供统一的对比基础。从两个区域对比结果看，最具一致性的中—深部异常主要集中于须家河组下部—雷口坡组上部对应层位。该层段在不同测线剖面上多表现为层状、似层状或椭圆状低阻响应，与其上下相对稳定的中阻或高阻层形成较清晰的电性差异，为重点目标层位。

4　目标层位低阻异常的地质意义

根据广域电磁一维、二维反演结果，研究区目标低阻异常具有较为一致的层位特征，主要集中于须家河组下部—雷口坡组上部。该层位在不同测线和不同区域中均可识别出稳定低阻响应，异常形态以层状、似层状和椭圆状为主，空间产出特征较为稳定，表明广域电磁方法对目标含卤层位具有较好的



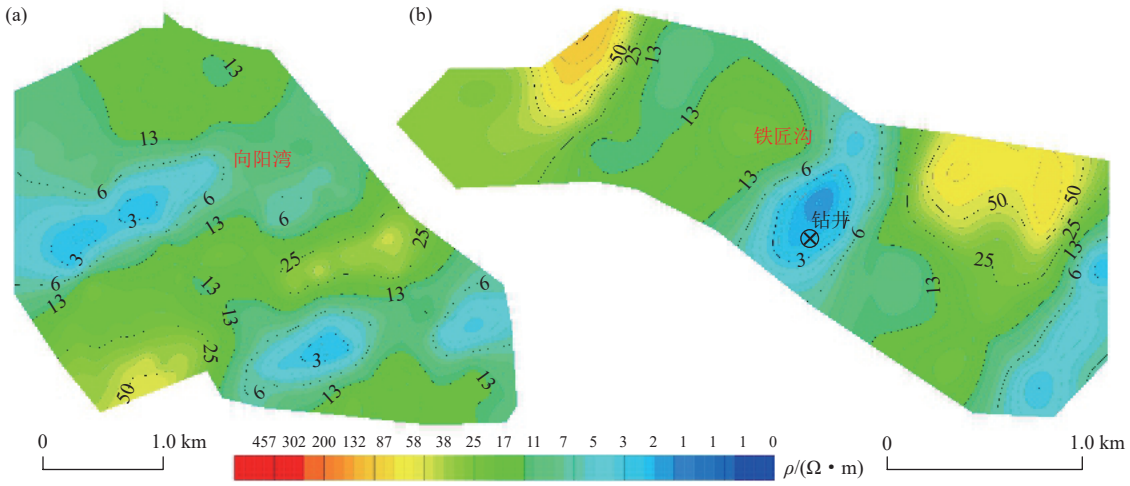
a—XYWNE05; b—XYWNW02

图 7　向阳湾区域广域电磁法反演电阻率断面

Fig. 7　Inversion resistivity section of WFEM in the Xiangyangwan area

识别能力。进一步提取须家河组下部和雷口坡组上部对应的低阻异常层位的电阻率低值极值，并结合电阻率异常平面分布特征分析可见，各区域之间仍存在一定差异，主要反映在异常规模、展布方式和局部连续性上。铁匠沟区域低阻异常主要分布于区域中南部，整体呈片状—带状展布；向阳湾区域低阻异常分布范围较大，南、北两部分别形成由多个低阻中心串联组成的低阻带，但两者之间连续性较差。总体上看，这些差异并未改变两个区域在目标层位上均发育稳定低阻异常这一基本特征，研究区目标层位具有较好的区域可对比性。须家河组下部—雷口坡组上部是自贡地区重要的黄卤产出层位(图 8)，也是区内长期找卤和开发的主要目标层，因此该层位低阻异常的识别具有明确的地质指向意义。根据广域电磁剖面识别出的目标低阻异常，在综合区域水文地质条件基础上，于铁匠沟中部布设探采结合井一处(图 8b)，孔深 1 315 m，根据首日测试结果，液面降至深度 1 000 m 左右基本保持稳定，大致对应 TJGNE04 和 TJGNW02 测线交点位置须家河组底部，广域电磁剖面显示为低阻异常，对应较好，表明广域电磁方法对目标含卤层位具有较好的实际指导作用。结合自贡地区已有地质和钻井资料，目标层位持续出现的低阻异常可以作为识别含卤有利部位的可靠地球物理标志。

地下卤水在沉积盆地中的赋存，并不是单纯由某一类构造部位决定，而是受储层条件、裂隙导流能力与后期保存环境共同控制。对自贡地区这类以褶皱构造为主的老盐区而言，传统找卤工作长期偏重于背斜轴部、高点及断裂发育带，其依据在于这些部位通常应力集中、裂隙较发育，能够为卤水运移和聚集提供通道。这一认识在早期勘查部署中具有一定指导意义，但对褶皱翼部等非优势构造部位关注相对不足。本次广域电磁识别结果及钻井验证表明，地下卤水的有利赋存空间，可能并不对应构造变形最强的部位，反而可能出现在构造活动强度中等的过渡带。有研究指出，对于埋藏较浅的地下卤水矿，背斜轴部裂隙过于发育时，保存条件反而可能变差；大气降水可沿裂隙系统下渗，造成高 TDS(总溶解固体)卤水被稀释或破坏[17]。相反，构造变形较弱的部位虽有利于保存，但裂隙和运移通道不足，又可能不利于卤水富集。因此，地下卤水的有效富集与长期保存，可能更依赖于适度构造变形条件，即同时具备



a—向阳湾; b—铁匠沟

a—Xiangyangwan; b—Tiejianggou

图 8　须家河组下部—雷口坡组上部反演电阻率异常平面

Fig. 8　Planar distribution of resistivity anomalies from the lower part of the Xujiahe Formation to the upper part of the Leikoupo Formation

一定导流能力和较好的封存条件[18]。结合本文结果，两个褶皱翼部区域均在该层位识别出稳定低阻异常，且低阻响应与黄卤赋存层位之间具有清楚的层位对应关系，说明褶皱翼部同样具备良好的找卤前景，这些区域处于裂隙导流条件与保存条件相对平衡的位置，这正是其具备找卤潜力的重要原因。向斜构造本身在一定程度上也能起到汇聚流体的作用，若翼部存在合适的储集层和盖层条件，便容易形成规模性的低阻异常。因此，目标层位低阻异常的空间展布特征，不仅验证了传统找卤层位的正确性，更重要的是拓展了找卤的构造类型和空间范围，为在复杂构造背景下精准锁定卤水资源靶区提供了重要的地球物理依据，也为理解沉积盆地中卤水的运聚规律和保存条件提供了新的视角。

5　结论

1）采用广域电磁法在自贡地区进行测深工作，发现了位于须家河组 1、2、3 段存在的大范围低阻异常。结合自贡地区地质资料，该层位与已知黄卤赋存层位对应较好，布设钻井显示卤水的存在，表明广域电磁法是获取地下深层卤水分布范围和埋深的有效探测手段。

2）两组部署于褶皱翼部的广域电磁测线探测结果显示，背斜翼部与向斜翼部同样发育连续稳定的深部低阻异常体，其电性特征指示该部位具备地下卤水赋存与保存的潜在条件，深化了对褶皱构造中地下卤水赋存规律的认识，并为拓展深部找卤空间提供了新的物探思路。

参考文献（References）：

[1] 杨卉芃, 柳林, 丁国峰. 全球锂矿资源现状及发展趋势 [J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(5): 26−40.
Yang H P, Liu L, Ding G F. Present situation and development trend of lithium resources in the world[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(5): 26−40.

[2] 王核, 黄亮, 白洪阳, 等. 中国锂资源的主要类型、分布和开发利用现状: 评述和展望 [J]. 大地构造与成矿学, 2022, 46(5): 848−866.
Wang H, Huang L, Bai H Y, et al. Types, distribution, development and utilization of lithium mineral resources in China: Review and perspective[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2022, 46(5): 848−866.

[3] 高峰, 郑绵平, 乜贞, 等. 盐湖卤水锂资源及其开发进展 [J]. 地球学报, 2011, 32(4): 483−492.
Gao F, Zheng M P, Nie Z, et al. Brine lithium resource in the salt lake and advances in its exploitation[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2011, 32(4): 483−492.

[4] 赵冬, 杜雪敏, 王士强, 等. 高镁、锂比盐湖卤水提锂研究 [J]. 盐科学与化工, 2017, 46(6): 40−44.
Zhao D, Du X M, Wang S Q, et al. Research on extraction from salt lake brine with high Mg/Li ratio[J]. Journal of Salt and Chemical Industry, 2017, 46(6): 40−44.

[5] 王登红, 代鸿章, 刘善宝, 等. 中国锂矿十年来勘查实践和理论研究的十个方面新进展新趋势 [J]. 地质力学学报, 2022, 28(5): 743−764.
Wang D H, Dai H Z, Liu S B, et al. New progress and trend in ten aspects of lithium exploration practice and theoretical research in China in the past decade[J]. Journal of Geomechanics, 2022, 28(5): 743−764.

[6] 刘丽君, 王登红, 刘喜方, 等. 国内外锂矿主要类型、分布特点及勘查开发现状 [J]. 中国地质, 2017, 44(2): 263−278.

Liu L J, Wang D H, Liu X F, et al. The main types, distribution features and present situation of exploration and development for domestic and foreign lithium mine[J]. Geology in China, 2017, 44(2): 263−278.

[7] 仲佳爱, 郑绵平, 唐学渊, 等. 川东北黄金口背斜三叠系深部杂卤石特征及成因探讨 [J]. 矿床地质, 2018, 37(1): 81−90.
Zhong J A, Zheng M P, Tang X Y, et al. Sedimentary characteristics and genetic study of deep polyhalite in Huangjingkou anticline of northeast Sichuan[J]. Mineral Deposits, 2018, 37(1): 81−90.

[8] 马黎春, 黄华, 张连元, 等. 湖北潜江凹陷古近系深层富钾卤水矿床特征及成因 [J]. 地质学报, 2015, 89(11): 2111−2118.
Ma L C, Huang H, Zhang L Y, et al. Characteristics of Paleogene deep potassium-rich brines in the Qianjiang depression, Hubei Province[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(11): 2111−2118.

[9] 甘会春, 袁世冲. 柴达木盆地小梁山—大风山区域深层卤水水化学特征及成因分析 [J]. 现代矿业, 2020, 36(1): 28−34.
Gan H C, Yuan S C. Hydrochemical characteristics and origin analysis of deep brine in Xiaoliangshan-Dafengshan area of Qaidam Basin[J]. Modern Mining, 2020, 36(1): 28−34.

[10] 周翊, 刘昌辉, 易胜利, 等. 四川盆地自贡地区下—中三叠统卤水富锂成因初探 [J]. 中国井矿盐, 2022, 53(5): 7−11.
Zhou Y, Liu C H, Yi S L, et al. Preliminary study on the origin of lithium enrichment in lower-middle Triassic brine in Zigong area, Sichuan Basin[J]. China Well and Rock Salt, 2022, 53(5): 7−11.

[11] 张兵, 王绪本, 郑绵平, 等. 四川盆地三叠系气田型深层富钾锂卤水勘探历程、进展与展望 [J]. 地球学报, 2024, 45(5): 665−677.
Zhang B, Wang X B, Zheng M P, et al. Exploration process, progress, and the prospect of deep potassium-rich lithium-rich brine in Triassic gas field of Sichuan Basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2024, 45(5): 665−677.

[12] Zhong J A, Lin Y J, Wang F M, et al. Origin and formation mechanisms of potassium- and lithium-rich brines in the Triassic strata of northeastern Sichuan Basin, South China[J]. Aquatic Geochemistry, 2024, 30(3): 163−178.

[13] 杨修猛, 刘文玉, 韩凤清, 等. 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 [J]. 湖泊科学, 2018, 30(1): 220−233.
Yang X M, Liu W Y, Han F Q, et al. Application of nuclear magnetic resonance(NMR) technology to study the space distribution features of underground brine from playa lakes: A case study of Kunteyi Playa Lake[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(1): 220−233.

[14] 杨洪宇, 张兵, 方朝合, 等. 四川盆地海相深层富钾锂层系沉积演化规律及储卤层响应特征 [J]. 地学前缘, 2021, 28(6): 95−104.
Yang H Y, Zhang B, Fang C H, et al. Sedimentary evolution of deep marine potassium/lithium-rich brine reservoirs in the Sichuan Basin and a comprehensive response model for the brine storage layer[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(6): 95−104.

[15] 吴建亮, 景阳, 徐云峰, 等. 四川自贡地区含锂卤水成矿作用与找矿模式研究进展 [J/OL]. 地质通报, 1-15[2026-03-18]. https://link.cnki.net/urlid/11.4648.P.20250417.1009.004.
Wu J L, Jing Y, Xu Y F, et al. Research progress on mineralization and prospecting model of lithium-bearing brine in Zigong area, Sichuan Province[J/OL]. Geological Bulletin of China, 1-15[2026-03-18]. https://link.cnki.net/urlid/11.4648.P.20250417.1009.004.

[16] 姜长龙. 四川盆地平落坝构造富钾卤水水化学特征及资源量评价 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
Jiang C L. Hydrochemical characteristics and resource evaluation of the K-rich brines in the pingluoba structure of the Sichuan basin[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013.

[17] 林耀庭. 四川盆地三叠系地下卤水储层特征及其富集的控制作用 [J]. 盐湖研究, 1999, 7(3): 1−7.
Lin Y T. Storage characteristics of the ground brine of Trias is Sichuan basin and the determination factors of its enrichment[J]. Journal of Salt Lake Research, 1999, 7(3): 1−7.

[18] 周训, 曹琴, 尹菲, 等. 四川盆地东部高褶带三叠系地层卤水和温泉的地球化学特征及成因 [J]. 地质学报, 2015, 89(11): 1908−1920.
Zhou X, Cao Q, Yin F, et al. Characteristics of the brines and hot springs in the Triassic carbonates in the high and steep fold zone of the eastern Sichuan Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(11): 1908−1920.

[19] 周训, 姜长龙, 韩佳君, 等. 沉积盆地深层地下卤水资源量评价之若干探讨 [J]. 地球学报, 2013, 34(5): 610−616.
Zhou X, Jiang C L, Han J J, et al. Some problems related to the evaluation of subsurface brine resources in deep-seated aquifers in sedimentary basins[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2013, 34(5): 610−616.

[20] 周训. 深层地下卤水的基本特征与资源量分类 [J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(5): 4−10.
Zhou X. Basic characteristics and resource classification of subsurface brines in deep-seated aquifers[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(5): 4−10.

[21] 张永帅. 四川盆地自流井构造深层地下卤水的富集和资源特征 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
Zhang Y S. Characteristics of enrichment and resources of the subsurface brines in the deep-seated aquifers in the Ziliujing brine-beaing structure of the Sichuan basin[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015.

[22] 林世贵, 徐文鉌, 吕端甫. 自贡地区深部卤层水文地质参数确定及卤水资源计算与评价 [J]. 成都地质学院学报, 1990, 17(1): 63-75.
Lin S G, Xu W J, Lyu D P. The determination of hydrogeological parameters in the deep brine aquifer and evaluation of brine reserves in Zigong area, Sichuan Provinces[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 1990, 17(1): 63-75.

[23] 陶宏. 自贡盐场黄黑卤盛衰演变 [J]. 盐业史研究, 2003(3): 38−44.
Tao H. The rising and falling evolvement of yellow and black brine of Zigong salt site[J]. Salt Industry History Research, 2003(3): 38−44.

[24] 陈小炜, 周恳恳, 牟传龙, 等. 浅析四川盆地典型储卤构造地下卤水型锂资源潜力 [J]. 轻金属, 2016(10): 7−11.
Chen X W, Zhou K K, Mou C L, et al. Analysis of the potential of underground brine lithium resource in the typical brine-reserve structures in Sichuan Basin[J]. Light Metals, 2016(10): 7−11.

[25] 邹伟豪. 兴隆场背斜卤水及浅层天然气分布规律探讨 [J]. 中国井矿盐, 2016, 47(1): 24−26.
Zou W H. Discussions on the distribution regularities of anticlinal brine and superficial layered gas in Xinglong field[J]. China Well and Rock Salt, 2016, 47(1): 24−26.

[26] 詹涵钰, 马红嫚, 武文辉, 等. 四川自贡地区地下卤水锂矿化特征及靶区预测 [J]. 中国地质调查, 2018, 5(4): 17−24.

Zhan H Y, Ma H M, Wu W H, et al. Mineralization charateristics and target area prediction of underground brine lithium mine in Zigong Area, Sichuan Province[J]. Geological Survey of China, 2018, 5(4): 17−24.

[27] 杨晓玉, 阎建国, 侯磊, 等. 地震勘探在四川盆地富钾卤水资源评价中的应用效果分析 [J]. 地质找矿论丛, 2012, 27(4): 509−515.
Yang X Y, Yan J G, Hou L, et al. Application of seismic exploration to potassium-rich brine resources evaluation in Sichuan Basin and the effects analysis[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2012, 27(4): 509−515.

[28] 李进, 范翔宇, 熊鸿鸽, 等. 四川盆地富钾卤水地球物理特征及预测方法研究: 以川西地区为例 [J]. 地质科学, 2025, 60(2): 607−618.
Li J, Fan X Y, Xiong H G, et al. Research on geophysical characteristics and prediction method of potassium-rich brine in western Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2025, 60(2): 607−618.

[29] 姚菁, 于洪军, 徐兴永, 等. 莱州湾地区含卤层系沉积特征与卤水的形成 [J]. 海洋科学进展, 2010, 28(4): 473−477.
Yao J, Yu H J, Xu X Y, et al. Deposition characteristics in brine aquifers and brine formation in Laizhou Bay area[J]. Advances in Marine Science, 2010, 28(4): 473−477.

[30] 何继善. 广域电磁测深法研究 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(3): 1065−1072.
He J S. Wide field electromagnetic sounding methods[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(3): 1065−1072.

[31] 何继善. 深部矿产资源探测中电磁方法的若干进展 [J]. 贵州地质, 2013, 30(1): 1−8.
He J S. Some advances of electromagnetic method in the deeper prospecting of mineral resources[J]. Guizhou Geology, 2013, 30(1): 1−8.

[32] 孟超, 张慧, 张婷, 等. 广域电磁法在黄沙坪铅锌多金属矿田深部探测中的应用 [J]. 矿产勘查, 2024, 15(9): 1607−1616.
Meng C, Zhang H, Zhang T, et al. Application of wide field electromagnetic method in deep exploration of Huangshaping lead-zinc polymetallic ore field[J]. Mineral Exploration, 2024, 15(9): 1607−1616.

Exploration practice and geological implications of deep subsurface brine along the flanks of complex folds in the southern Zigong area, Sichuan

HUAN Yi[1], SU Jin-Bao[1], ZHENG Xiao-Gang[2], CUI Jian-Jun[3], ZHU Zi-Qiang[4]

(1. *College of Oceanography , Hehai University*, *Nanjing* 210098,*China*; 2. *Sichuan Geology and Mineral Resources* (*Group*) *Co., Ltd.*, *Chengdu* 610017, *China*; 3. *Institute of Geomechanics*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*; 4. *China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Subsurface brine in the Zigong area of the Sichuan Basin contains salt and is also enriched in critical metal lithium, primarily occurring in the axial parts of anticlines. After years of exploitation, the Zigong area is now facing scarce brine resources and difficulty in reserve replacement. Fold flanks in the area may hold considerable resource potential; however, there is a lack of studies on deep brine exploration along fold flanks. This study investigated deep subsurface brine in the Tiejianggou and Xiangyangwan zones, which are located along anticlinal and synclinal flanks in the Zigong area, respectively. Petrophysical investigation and wide-field electromagnetic exploration reveal significantly varying deep electrical properties in both zones. Based on stratigraphic and structural constraints, this study performed comprehensive interpretations of deep electrical structures and low-resistivity anomalies in both zones. The results indicate that a 1500-m-deep profile in both zones exhibits significant electrical zonation characterized by low resistivity in the upper part and high resistivity in the lower part. The interval spanning from the lower part of the Xujiahe Formation to the upper part of the Leikoupo Formation is identified as a favorable exploration target. Layered, quasi-layered, or elliptical low-resistivity anomalies are identified in both zones, corresponding well to the occurrence horizons of regionally proven yellow brine. Drilling results of the Tiejianggou zone further verify the reliability of the geological anomaly interpretation. The findings lead to the conclusion that fold flanks also exhibit favorable conditions for the enrichment and preservation of subsurface brine, representing an important replacement for deep brine prospecting in the Zigong area. The results of this study provide novel insights for both resource exploration in the periphery of mature salt-producing areas and the investigation of the occurrence patterns of subsurface brine.

Key words: wide-field electromagnetic exploration; deep subsurface brine; low-resistivity anomaly; fold flank

（本文编辑：叶佩）