

连续电磁剖面法在塔里木盆地麦盖提斜坡裂陷槽 深部构造研究中的应用

屈洋¹, 杨钰菡², 黎立¹, 唐强强²,
孙迪¹, 罗强¹, 葛大壮²

(1. 中国石油塔里木油田勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000;
2. 成都理工大学地球勘探与信息技术教育部重点实验室, 成都 610059)

[摘要] 随着对塔里木盆地深层油气勘探认识不断深入,认为震旦—南华系裂陷槽对烃源岩的发育保存有着重要的控制作用,因此对该区域的裂陷槽探测是油气勘探的重要探索方向。前人研究认为对塔西南地区麦盖提斜坡处存在震旦—南华系裂陷槽,但受限于该区域地震资料品质,对该区域深层结构尤其是对基底和裂陷槽分布形态和范围认知不清。因此,通过一条跨过麦盖提斜坡与叶城凹陷的连续电磁剖面法剖面,结合研究区地质情况与井资料,构建了区域电阻率的物性分层结构,完成了对实际数据的二维反演,获取了该区域的深部电性结构与 CEMP 剖面的综合地质解释结果。为该区域新元古代裂陷槽发育情况的判断提供了新的电磁证据,也进一步刻画了基底、裂陷槽的电性特征与结构。探测结果认为裂陷主要由正断层控制,呈现裂陷群特点,裂陷多呈半地堑、不对称地堑及堑—垒相间的构造样式,在麦盖提斜坡、叶城凹陷处中部、南部的区域发育两个裂陷群,有利于区域内的烃源岩沉积,其中裂陷内震旦—南华系地层沉积较厚的区域具有较好的深层油气勘探潜力。

[关键词] 麦盖提斜坡;连续电磁剖面法;震旦—南华系;裂陷槽;烃源岩

[分类号] TE1;P618.13

[文献标志码] A

Application of continuous electromagnetic profiling method to the exploration of a rift depression in Maigaiti slope, Tarim Basin

QU Yang¹, YANG Yuhuan², LI Li¹, TANG Qiangqiang²,
SUN Di¹, LUO Qiang¹, GE Dazhuang²

1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development,
PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla 841000, China;

2. Earth Exploration and Information Technology Key Laboratory of Ministry of Education,
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

[收稿日期] 2023-02-06。

[基金项目] 塔里木油田公司项目(T202107)。

[第一作者] 屈洋(1991—),男,工程师,研究方向:石油天然气勘探,E-mail:quyang-tlm@petrochina.com.cn。

[通信作者] 杨钰菡(1999—),女,博士研究生,研究方向:大地电磁正反演研究,E-mail:yang_yuhan@stu.cdut.edu.cn。

[引用格式] 屈洋,杨钰菡,黎立,等,2024.连续电磁剖面法在塔里木盆地麦盖提斜坡裂陷槽深部构造研究中的应用[J].成都理工大学学报(自然科学版),51(1):152-163.

Qu Y, Yang Y H, Li L, et al., 2024. Application of continuous electromagnetic profiling method to the exploration of a rift depression in Maigaiti slope, Tarim Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(1):152-163.

Abstract: With deepening understanding of the deep oil and gas exploration in the Tarim Basin, the Sinian-Nanhua rift trough plays a crucial role in controlling the development and preservation of source rocks. Hence, detecting the rift trough in this area is a pivotal exploration direction for oil and gas. Previous studies have suggested the existence of the Sinian-Nanhua rift trough in the southwestern Tarim area, particularly on the Maigaiti slope. However, due to the limited quality of seismic data in this region, our understanding of deep structures, especially the basement and the distribution and extent of the rift trough, remains limited. By implementing CEMP (Continuous Electromagnetic Profiling) section through the Maigaiti slope and the Yecheng depression in the southwestern depression, and correlating geological conditions with well data, we constructed a layered resistivity structure model. From the two-dimensional inversion of actual data, we derived both the deep electrical structure and comprehensive geological interpretation of the area. We provided new electromagnetic evidence for assessing the development of the Neoproterozoic rift trough in this region, and further delineated the electrical characteristics and structures of both the basement and rift trough, and our analysis suggested that the trough was predominantly controlled by normal faults, showcasing a pattern of half grabens, asymmetrical grabens, and alternating graben-horst structures. Two sets of rift troughs, evident in the central and southern parts of the Maigaiti slope and Yecheng depression, enhance the deposition of source rocks in the area. In regions where the Sinian-Nanhua strata are more prominent, there exists enhanced deep oil and gas exploration potential.

Key words: Maigaiti slope; CEMP; Sinian-Nanhua; rift trough; source rock

近年来,随着四川盆地寒武系油气勘探认识不断深入,认为裂陷槽存在有利于烃源岩的保存,是油气富集的有利区,裂陷槽的勘探对该区域超深层油气勘探的不断突破具有重要的指导意义(邹才能等,2014;周国晓等,2020;邱玉超等,2019)。塔里木盆地与四川盆地具有相似大地构造背景与演化过程(孙冬胜等,2022),伴随罗迪尼亚超大陆的聚合—裂解过程,盆地处于拉张构造背景(管树巍等,2017),发育有南华—震旦系裂谷(朱光有等,2018)。南华系裂陷到震旦系凹陷转变,寒武系继承于在南华—震旦系裂谷中,因此对该区域的裂陷槽探测是油气勘探的重要探索方向,可指导寒武系烃源岩分布范围的划分(李勇等,2016)。

塔里木盆地,北部、中南部、西南部形成了 3 个裂陷群,其中北部裂陷群为近北西西向展布,分布于今阿瓦提-满加尔坳陷与塔北隆起。中南部裂陷群为位于现今构造单元的麦盖提斜坡,由多个离散断陷组成,西南裂陷群位于盆地西南,处于塔西南坳陷与麦盖提斜坡的西部,展布方向以北西西为主(何碧竹等,2019)。前人认为塔里木盆地南华系具有“两隆四坳”的构造格局,其中麦盖提凹陷中发育有裂谷盆地(陈永权等,2022),在沉积相图的约

束指导下,麦盖提斜坡可以作为寒武系勘探的潜力区带(杨海军等,2021),基底和基底断层与盆地沉积密切相关(Lin et al.,2015)。

塔里木盆地的地壳层状结构明显,有明显的横向不均匀性,南北塔里木盆地结晶基底反映出不同的散射地震组构(高锐等,2002;于常青等,2012;瞿辰等,2013)。地震勘探结果认为在西部泽普—麦盖提地区发育南华系裂谷,裂谷内部震旦系地层加厚,表现为受两条主控断裂控制的双边裂谷盆地(陈永权等,2019)。利用航磁数据通过三维欧拉反褶积对塔里木盆地的磁源体异常源的埋藏深度进行分析,认为深度 10~20 km 的磁性体来自结晶基底,5~20 km 麦盖提斜坡中部与底部与和田凹陷交集处磁源体异常较为集中,且存在较强非均一性(杨文采等,2012;崔志强等,2020),重力勘探结果显示塔里木盆地可能存在统一分布的古元古界结晶基底(Deng et al.,2017),利用大地电磁勘探方式显示电性存在垂向分层,深部 20 km 存在大范围高阻,可能为基底的电性显示(杨文采等,2015a,2015b;杨鑫等,2014),其中在麦盖提斜坡处上深度 10 km 以上电性为低阻,10~60 km 深度范围麦盖提斜坡中部部分有明显高阻突起,与航磁数据磁源体密集分布位置

根组,阿尔塔什组;第三层为二叠系、石炭系泥盆系及志留系,地层发育有阿恰群,南闸组,小海子组,卡拉沙依组,巴楚组,东河塘组及克兹尔塔格组等,综合电性特征确定了灰岩为主的次高阻;根据 YL6 井结果将第四层的奥陶系、寒武系确定为高阻,其岩性表现为白云岩为主。根据岩性而对更深的震旦系及以下地层,岩性为大理岩、蛇纹岩等,电阻率推测其比第四层更高,但无其他可靠钻井资料支持。推测认为其整体变化规律为次高一低一次高一高阻分布(表 1)。

通过对区域内多井深侧向电阻率值进行地层平均电阻率值统计,岩性与电阻率的大小为 $\rho_{膏岩} > \rho_{白云岩} > \rho_{灰岩} > \rho_{砂岩} > \rho_{粉砂岩}$ 。由于粉砂岩与泥岩

电阻率值较低,泥岩层厚较薄,因此较难单独统计电阻率,而大理岩、蛇纹岩等变质岩埋深较深因无对应测井电阻率值曲线因此无法进行统计,本次统计方法只粗略统计了各地层的主要岩性及平均电阻率,同一电性层内具有较大差异,但其厚度较薄的地层均未纳入整体电性分层中。其中阿尔塔什组层厚较薄,其岩性为含膏泥岩、膏岩,高阻特征无法从反演电阻率剖面中识别,因将该层电性划分为第二层新近系与古近系的整体低阻。该条剖面在垂向上有明显的电阻率差异性与分层性,整体规律呈现 4 层电性变化,为使用连续电磁剖面(CEMP)方法进行深部结构勘探提供较好的方法应用基础。

表 1 研究区地层岩性及电阻率
Table 1 The lithology and resistivity in the study area

年代	地层	岩性	电阻率/($\Omega \cdot m$)
新近系	帕卡布拉克组	粉砂岩、泥岩	23.929
	安居安组	粉砂岩、泥岩	21.471
古近系	齐姆根组	膏质泥岩、膏岩	46.233
	阿尔塔什组	膏岩	6224.184
二叠系	阿恰群	泥岩、泥质粉砂岩	45.458
	南闸组	灰岩、泥质灰岩	287.146
石炭系	小海子组	灰岩	529.149
	卡拉沙依组	白云质灰岩、灰岩、泥岩	877.987
泥盆系	巴楚组	泥岩、白云质灰岩	262.987
	东河塘组	粉砂岩	27.155
志留系	克兹尔塔格组	砂岩、粉砂岩	36.669
奥陶系	蓬莱坝组	白云岩、含灰白云岩	1253.776
	鹰山组	白云岩	962.464
寒武系	下丘里塔格组	白云岩、含泥白云岩	2067.339
	阿瓦塔格组	膏岩、泥膏岩、膏盐岩	13333.351

2 CEMP 数据采集与处理

2.1 基本理论与方法

大地电磁测深法目前常被应用于深部电性结构研究及能源与矿产勘探等方面,该方法以麦克斯韦方程组为理论基础,是通过采集不同频段的天然交变电磁场数据来获取地下介质的电性响应特征。地下的岩性变化及特殊构造,含水溶洞等不同地质体的存在都会影响电阻率分布情况,因此可通过分析剖面的电性特征来揭示地下构造的展布情况。而在油气田中勘探应用中,常采用连续电磁剖面(CEMP)方法。该方法相对于常规 MT 勘探,其高密度采样、全信息四分量观测等特

点能获得更高分辨率,有效压制静态效应,更好适应油气田勘探的高精度要求(刘宏等, 2004)。

2.2 数据采集与预处理

研究区布设 CEMP 测线,总长 488 km,点距为 200 m 左右,测点 2 441 个,测线经过一级构造单元西南拗陷中的叶城和田凹陷,麦盖提斜坡,东南拗陷,走向为东南方向,坐标从南到北逐渐增大,测线经过相应构造单元位置见图 1。采用“十”字型布极方式,采集 E_x, E_y, H_x, H_y 4 个电磁分量,采集频点 40 个,频率为 0.000 55~320 Hz,单点采集时长大于 10.15 h。

在资料的预处理和解释过程中,为保证大地

电磁本身的特性,经过预处理后的视电阻率曲线与处理前结构保持一致,且处理后曲线相对光滑,从高频到低频信息逐步减少,符合电磁勘探规律。从预处理后测点中选取部分测点对其视电阻率曲线进行分析,从宏观上了解该区域的电性结构特征,以辅助后期地质解释工作。

选取了剖面 6 个处于不同构造单元的测线,选取里程分别在位于南天山山前冲断带的 20 km 测点(图 2-A),处于西南拗陷及麦盖提斜坡的 80 km、161 km、261 km 测点(图 2-B,C,D),位于塘古凹陷的 362 km 测点及位于民丰凹陷的 462 km (图 2-E,F)来观察视电阻率与相位的形态差异。

从视电阻率及相位曲线观察可得,视电阻率曲线值均在 $100 \Omega \cdot m$ 以内,电阻率曲线呈总体呈高一低一高曲线形态,尾支上扬明显,代表了深部较高的岩石电阻率,也代表深部白云岩、灰岩岩石测井统计结果与电阻率形态保持一致。在相同构造单元内,电阻率及相位曲线形态趋于一致,但在不同构造部位深部存在较大值差异。比较 xy 和 yx 向的视电阻率和相位曲线数据,频率 $0.1 \sim 1000 \text{ Hz}$ 电阻率和相位数据重合度较高,表明浅层结构二维性较强;而低频部分相位部分差异较大,视电阻率尾支分离,表征深层结构三维性较强,地质结构较为复杂。

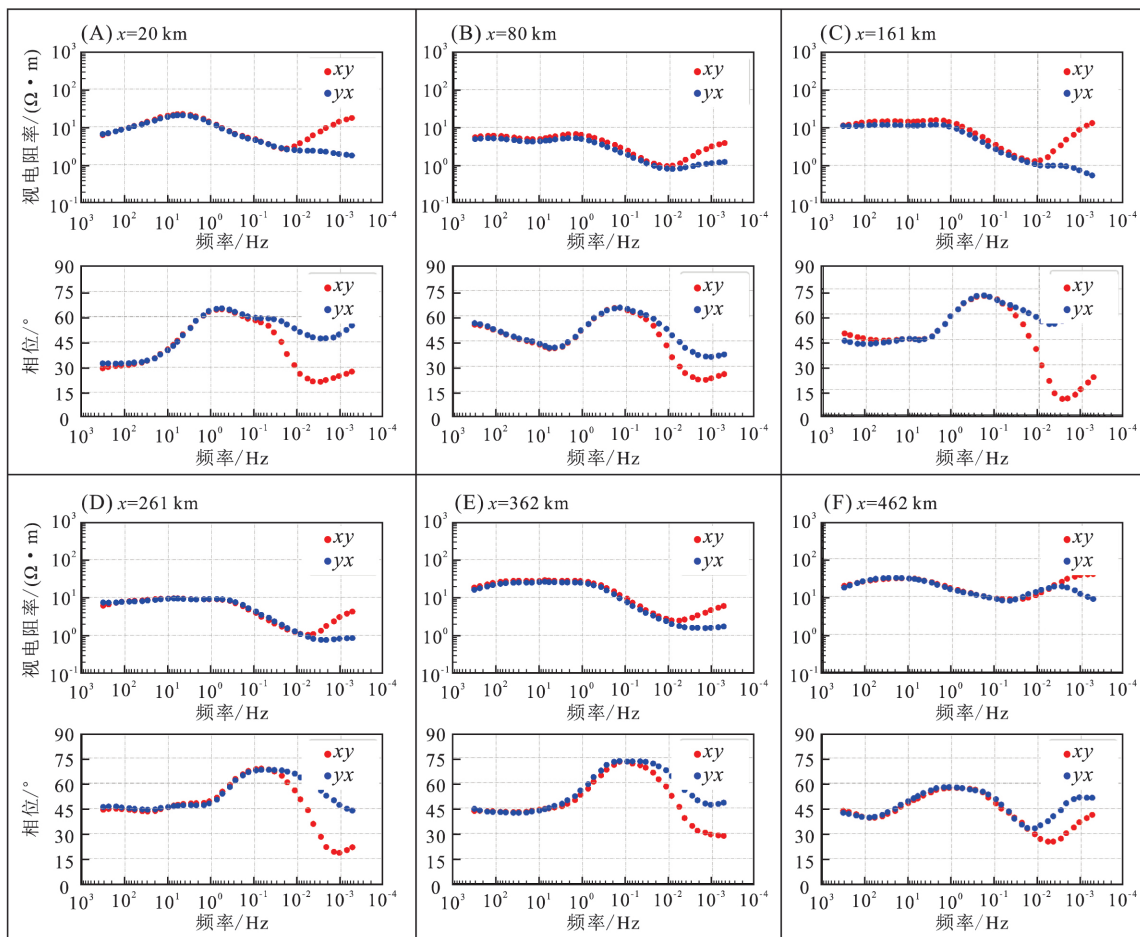


图 2 部分选取测点的视电阻率相位曲线

Fig. 2 Apparent resistivity and phase curves from selected sites

(A-F)分别为 20 km、80 km、161 km、261 km、362 km、462 km 处 xy 和 yx 分量的视电阻率和相位曲线

3 反演处理与成像

NLCG 反演算法是一种快速、稳定、收敛的二维反演计算方法(Rodi et al., 2001),其正演模拟方法是基于有限差分法。反演计算的基本策略

如下:

反演计算的目标函数表示为:

$$\phi(m) = [d - F(m)]^T V^{-1} [d - F(m)] + \lambda m^T L^T L m \quad (1)$$

式中: λ 为正则化因子; V 为与误差向量 e 有关的协

方差矩阵; L 为与模型参数相关的二维微分矩阵。

NLCG 反演计算可以简单描述为:

$$\begin{cases} m_0 = \text{given} \\ \phi(m_l + a_l p_l) = \min_a \phi(m_l + a p_l) \\ m_{l+1} = m_l + a_l p_l, l=0, 1, 2, \dots, n \\ \beta_l = \frac{g_l^T C_l (g_l - g_{l-1})}{g_{l-1}^T C_{l-1} g_{l-1}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: m_0 为初始模型, 自定义参数; a_l 为搜索步长; p_l 为模型空间的搜索方向。

p_l 可以采用下面的关系式来确定:

$$\begin{cases} p_0 = -C_0 g_0 \\ p_l = -C_l g_l + \beta_l p_{l-1}, l=1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (3)$$

式中: C_l 为先验信息或先验矩阵, $C_l = (\gamma_l I + \lambda L^T L)^{-1}$; 当不存在先验信息时, 先验矩阵将变为单位矩阵, 即 $C_l = I$ 。

实践证明, NLCG 反演处理方法处理实际资料时有效可行, 不仅节省反演计算时间, 还只需较小的存储量, 便能较好圈定异常体的边界信息(康敏等, 2017)。另外, NLCG 反演方法可以进行 TE 和 TM 视电阻率的联合反演及多种联合反演方法, 提高反演精度。

数据正演模拟及处理均利用成都理工大学开发的 Mtsoft-3.0 软件进行。

3.1 理论模型模拟

根据区域物性统计结果, 设计了裂陷槽的理论模型, 模型共设计了 6 层, 根据物性统计电阻率变化, 设置模型为次高一低一次高一较高一低—高阻模型, 模型设置参数见图 3。其中将震旦—南华系地层电阻率设置为低阻, 形态设计为局部凹槽, 符合裂陷槽在现有地震资料上的展布形态。

正演模拟参数频率选取 0.000 55~320 Hz, 频点数设置为 40 个, 模型长 60 km, 宽 20 km, 反演网格采用矩形网格剖分, 首层厚度为 50 m, 增长倍数为 1.25。反演方案与实际反演采用方法一致。

通过正反演模拟结果, 见图 4、图 5, 裂陷槽在正演模拟中, 低阻结构响应清晰, 在反演剖面上裂陷槽的低阻结构能在剖面上出现明显的低阻层变厚的趋势, 与高阻基底有着较好的区分度, 理论模型模拟证明了 CEMP 勘探方法识别裂陷槽的可靠性。搭建了采用实际资料勘探裂陷槽的理论基础。

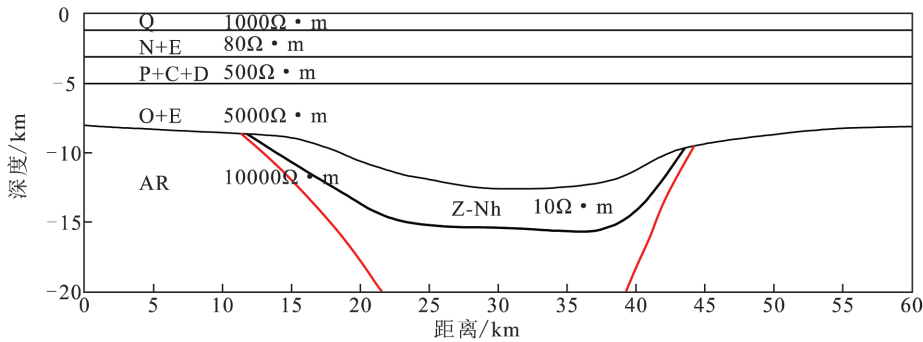


图 3 裂陷槽理论电阻率模型
Fig. 3 Resistivity model of the rift depression

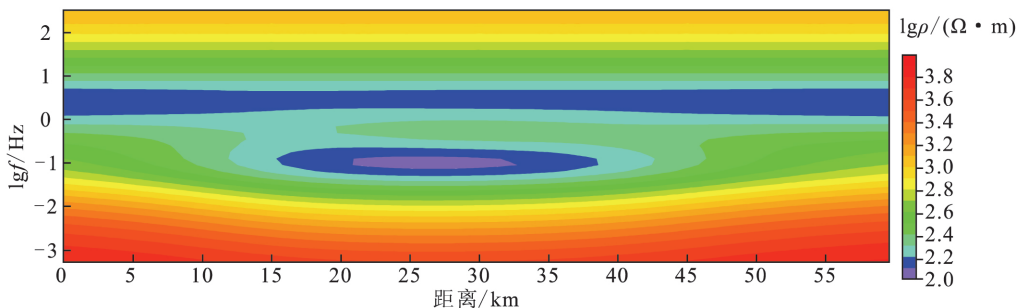


图 4 模型正演响应结果
Fig. 4 Forward result of the model

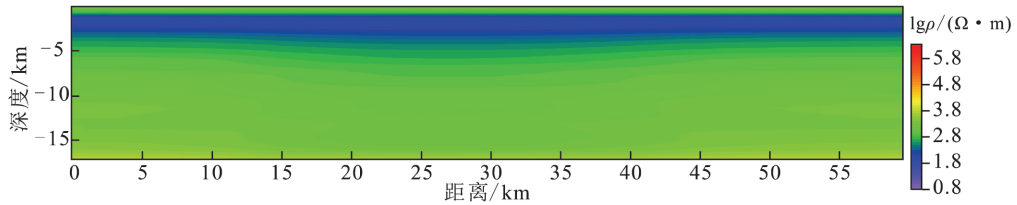


图 5 模型反演成像结果
Fig. 5 Inversion result of the model

3.2 实际数据处理与反演

数据处理在保留数据曲线形态下对噪声与静态位移进行了修正,整个资料处理过程为:在实测数据预处理(包括曲线编辑、静校正、空间滤波等)的基础上,对长剖面进行重叠分段反演,每段的反演流程为:首先采用 Bostick 变换形成初始模型,然后再进行二维非线性共轭梯度反演迭代,若达到收敛条件,则终止反演,输出反演结果。当所有分段都完成以上反演处理后,则对重叠段删除边界影响部分,对各分段反演结果进行光滑衔接,形成整个剖面的反演结果数据体后,再用 Surfer 等成图软件绘制出最终成果图件,以供地质解释使用。

4 综合地质解释

由于地球物理方法在地质解释的过程中存在诸多的不确定性,为增加剖面解释的合理性,在曲线分析的基础上,通过对不同构造模型进行模拟验证,提取电性构造在反演剖面上的信息,同时利用区域实际地质、钻井、地震、CEMP 测线首支视电阻率等资料信息总结规律,以理论辅助反演剖面的地质解释。

4.1 实际资料解释

采用非线性共轭梯度法对剖面进行二维反演,其结果如图 6 所示。

剖面左侧为靠近天山的区域,受南天山造山

带的影响,基底抬升较高,因此左侧为显示底部为一埋深较浅的高阻异常。表层高阻,推测为第四系砾石等高阻沉积物,厚度较大的新近系和古近系,表现为地层电阻率较低,因此在反演剖面上显示为低阻异常,低阻层连续。剖面右侧受昆仑山影响,表现与剖面左侧相似,高阻区域埋深变浅,但该向更靠近西昆仑山前构造带,因此高阻抬升更高,对实际地质情况对应良好。

根据该区域实际的地质资料与 QUN6, QG1 与 TC2 三口井测井资料标定,确定第四系层电阻率的 $\lg 0.4 \sim \lg 0.6 \Omega \cdot m$ 之间,古近系底为 $\lg 0.4 \Omega \cdot m$,石炭系底为 $\lg 0.8 \Omega \cdot m$,根据剖面电阻率数值的变化,推断 $e, Z-Nh$ 界面的位置,因此,纵向从上到下可以划分 6 套地层:第四系,新近系与古近系,二叠系、石炭系与泥盆系,奥陶系与寒武系,南华系与震旦系及基底。断裂划分依据为剖面数值的突变区与连续性较差且上下起伏较大地区。裂隙槽的电性特征表现为局部凹槽形态特征,深层高阻的埋深变深,上覆低阻层变厚区域。

以反演剖面为主,结合该剖面所经路径上的地质露头信息及研究区内实际地质构造情况,该剖面的综合地质解释结果如图 7 所示。

盆地内经历多期构造运动,深部与浅部构造样式具有明显差异,具有典型的基底和盖层的双层结构,断裂在坳陷和山前带样式存在差异,深部以大规模的正断层为主,浅部山前带区域以逆冲

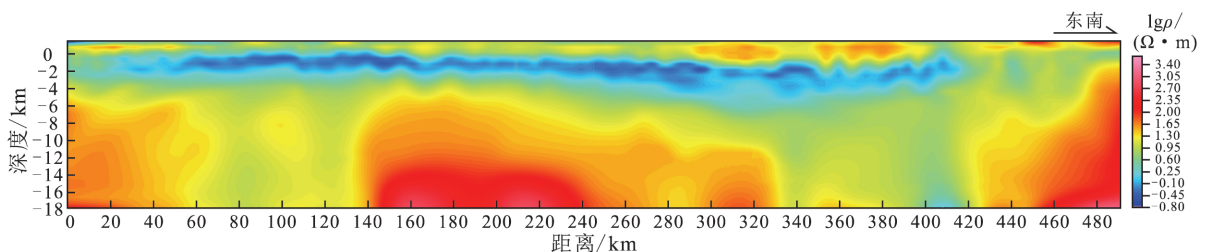


图 6 测线反演结果剖面
Fig. 6 Inversion result along the CEMP profile

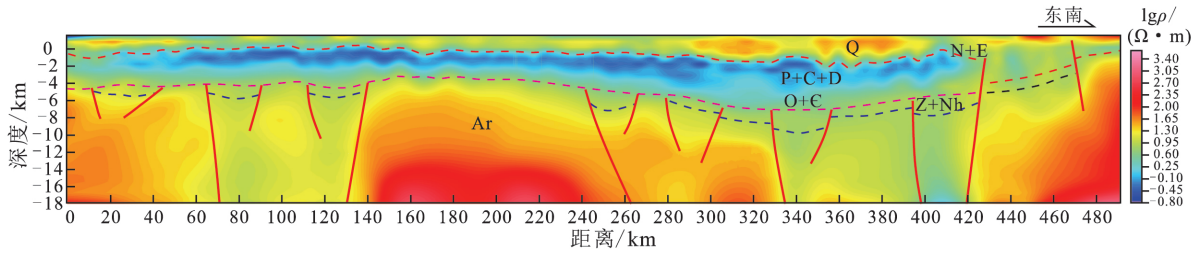


图 7 CEMP 反演电阻率地质解释剖面图

Fig. 7 Interpretation result along the CEMP profile

断层为主。在 70~130 km、240~400 km 处可能为塔里木地块在裂解过程中长期活动形成的低阻区域,低阻层沉降明显,可能代表工区内存在多个伸展环境的新元古代裂陷,上覆的沉积层厚度变厚,并发育有大规模正断层,推测裂陷由正断层控制,且主体裂陷作用相对分散,呈现裂陷群特点,在裂陷群中裂陷由多个次级断裂和半地堑共同组成。

4.2 裂陷槽分布探讨

以图 7 地质解释剖面图与图 8 构造剖面为依据,按地层叠置关系和电性界面推测裂陷槽分布区域。区域高阻基底的岩性主要为元古代的花岗岩与变质岩为主(邬光辉等,2012),在电性上呈明显的高阻特征(向葵等,2023),因此通过基底的高阻电性特征去反推上覆的低阻的沉积层厚度变化,来定位裂陷槽的分布位置,能补充对深部结构中基底、裂陷槽的分布认识。

对于剖面上 70~130 km、240~400 km 处,

该区域内深部 6~8 km 处电性呈不均匀分布,出现了高低阻交错或低阻层连续增厚或减薄的形式,这可能代表了区域前寒武系发育大型区域不整合,寒武系与震旦系不连续沉积(严威等,2018)。两个区域的划分主要根据其存在明显的电性边界,电性变化剧烈,推测为基底断裂的响应,并结合区域内小规模的不均匀性推测存在次级断裂,因此结合剖面认为基底断裂主要由控制裂陷群的主断裂、控制内部裂陷的次级断裂组成,主断裂从南华纪到震旦纪继承性活动,震旦纪末期至早寒武世断裂活动减弱或停止,受次级断裂控制,裂陷多呈半地堑、不对称地堑及堑—垒相间的构造样式。推测在罗迪尼亚超大陆裂解过程中,塔里木地块内部相互作用,发生一系列控盆断裂活动,在研究区内产生了类型以大陆裂谷及陆内断陷为主的裂陷,裂陷大规模发育堑垒构造,形成了多种裂陷构造样式。

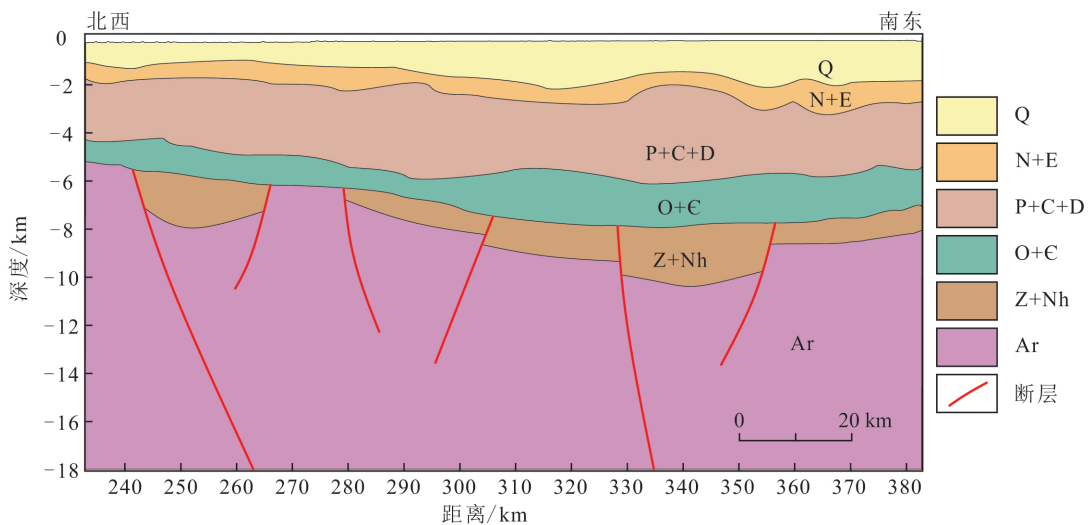


图 8 裂陷槽构造剖面

Fig. 8 Structural profile of the rift depression

根据本次 CEMP 刻画裂陷槽发育位置绘制了平面分布图(图 9),结合地震资料(严威等, 2018),支持推测西南坳陷区域的裂陷在平面上为条带状分布,主要分布在麦盖提斜坡和喀什-叶城坳陷的中-南部,其所推测裂陷槽发育位于置麦盖提斜坡与叶城凹陷的中部与南部与前人论述的塔里木克拉通南华纪、震旦纪的麦盖提坳陷位置(陈永权等, 2022)及塔里木盆地南华纪—震旦纪

构造古地理格局刻画的西南坳陷中—南部凹陷(杨海军等, 2021),在平面分布存在一定相似性,在地震剖面上也展现了基底存在较多正断层分布。根据对电性结构剖面的分析,进一步细化了裂陷槽北西—南东方向的平面边界范围。但该处仅有 1 条剖面进行裂陷槽分布范围刻画,仅能刻画剖面下局部裂陷槽分布与形态,对裂陷槽的整体分布范围划分依据不充分。

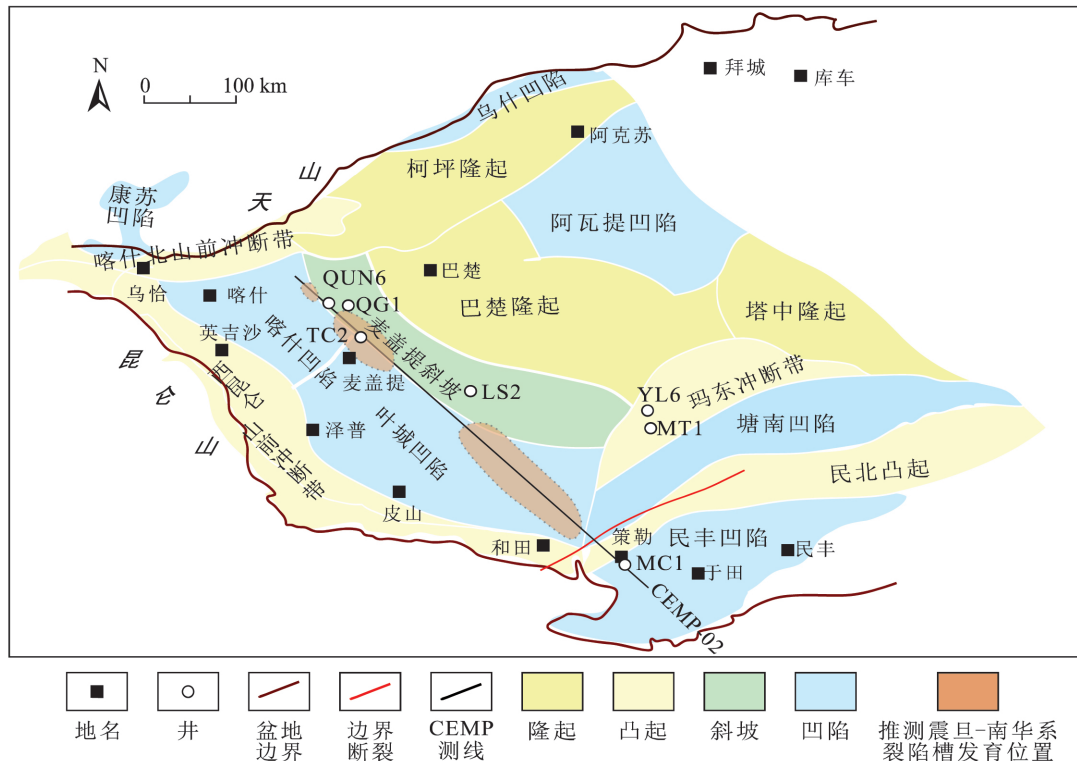


图 9 推测震旦—南华系裂陷槽发育位置平面分布图
Fig. 9 Distribution of Sinian-Nanhua strata and the rift depression

根据低阻层的厚度变化,代表了上覆沉积层的厚度变化,研究区内震旦—南华系受基底控制呈坳隆相间的形态,呈断块形态,剖面中寒武系与震旦—南华系地层呈不整合接触,控制了寒武系地层发育厚度,而石炭—二叠系与奥陶—寒武系等地层呈明显继承性发育,继而对其他地层产生了间接控制作用。在塔里木盆地早寒武世早期发育一套以暗色泥岩、硅质泥页岩为主的优质烃源岩,生烃潜力巨大,且下寒武统烃源岩分布受新元古代盆地发育特征的控制(吴林等, 2016; 朱光有等, 2016)。因此,根据电性剖面揭示在麦盖提斜坡、喀什叶城凹陷处中部、南部的两个裂陷有利于区域内的烃源岩沉积,其中裂陷内震旦—南华系

地层沉积较厚的区域具有较好的勘探潜力。

5 结论

a. 本文利用 CEMP 剖面、测井数据等资料,通过理论模型正反演模拟和实际资料的二维反演,确定了区域地层电阻率“次高-低-次高-高阻”的变化规律,明确了裂陷槽低阻、基底高阻的电性响应特征,获得了研究区深部电阻率模型。

b. 通过对塔西南地区西南坳陷的 CEMP 剖面进行综合地质解释,为该区域新元古代裂陷槽发育情况判断提供了新的电磁证据。揭示了西昆仑山前冲断带与南天山冲断带与西南坳陷及麦盖提斜坡的接触关系,进一步刻画了基底、裂陷槽的

电性特征与结构,推测裂陷由正断层控制,且主体裂陷作用相对分散,呈现裂陷群特点,在裂陷群中裂陷由多个次级断裂和半地堑共同组成,多呈半地堑、不对称地堑及堑—垒相间的构造样式。

c. 根据剖面低阻沉积层与高阻基底的分布规律,认为研究区内震旦—南华系受基底控制呈坳隆相间的形态,寒武系与震旦—南华系地层呈不整合接触,控制了寒武系地层发育厚度。剖面揭示了在麦盖提斜坡、喀什叶城凹陷处中部、南部的两个裂陷有利于区域内的烃源岩沉积,其中裂陷内震旦—南华系地层沉积较厚的区域具有较好的勘探潜力。

[参 考 文 献]

- 陈永权,严威,韩长伟,等,2019. 塔里木盆地寒武纪/前寒武纪构造——沉积转换及其勘探意义[J]. 天然气地球科学,30(1):39—50.
- Chen Y Q, Yan W, Han C W, *et al.*, 2019. Structural and sedimentary basin transformation at the Cambrian/Neoproterozoic interval in Tarim Basin: Implication to subsalt dolostone exploration[J]. *Natural Gas Geoscience*, 30(1): 39—50. (in Chinese)
- 陈永权,王晓雪,何皓,等,2022. 塔里木克拉通南华纪—寒武纪隆坳格局演化[J]. 中国石油勘探,27(4):30—46.
- Chen Y Q, Wang X X, He H, *et al.*, 2022. Evolution of uplift and depression framework of Tarim Craton in Nanhua-Cambrian[J]. *China Petroleum Exploration*, 27(4): 30—46. (in Chinese)
- 崔志强,胥值礼,李飞,等,2020. 基于高精度航空磁测的塔西南坳陷深部地质构造研究[J]. 地质与勘探,56(6):1238—1250.
- Cui Z Q, Xu Z L, Li F, *et al.*, 2020. Deep geological structure beneath the southwest Tarim Basin derived from high-precision aeromagnetic survey data[J]. *Geology and Exploration*, 56(6): 1238—1250. (in Chinese)
- 高锐,肖序常,高弘,等,2002. 西昆仑—塔里木—天山岩石圈深地震探测综述[J]. 地质通报,21(1):11—18.
- Gao R, Xiao X C, Kao H, *et al.*, 2002. Summary of deep seismic probing of the lithospheric structure across the West Kunlun-Tarim-Tianshan[J]. *Geological Bulletin of China*, 21(1): 11—18. (in Chinese)
- 管树巍,吴林,任荣,等,2017. 中国主要克拉通前寒武纪裂谷分布与油气勘探前景[J]. 石油学报,38(1):9—22.
- Guan S W, Wu L, Ren R, *et al.*, 2017. Distribution and petroleum prospect of Precambrian rifts in the main cratons, China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 38(1): 9—22. (in Chinese)
- 何碧竹,焦存礼,黄太柱,等,2019. 塔里木盆地新元古代裂陷群结构构造及其形成动力学[J]. 中国科学:地球科学,49(4):635—655.
- He B Z, Jiao C L, Huang T Z, *et al.*, 2019. Structural architecture of neoproterozoic rifting depression groups in the Tarim Basin and their formation dynamics[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 49(4): 635—655. (in Chinese)
- 康敏,胡祥云,康健,等,2017. 大地电磁二维反演方法分析对比[J]. 地球物理学进展,32(2):476—486.
- Kang M, Hu X Y, Kang J, *et al.*, 2017. Compared of magnetotelluric 2D inversion methods[J]. *Progress in Geophysics*, 32(2): 476—486. (in Chinese)
- 李勇,陈才,冯晓军,等,2016. 塔里木盆地西南部南华纪裂谷体系的发现及意义[J]. 岩石学报,32(3):825—832.
- Li Y, Chen C, Feng X J, *et al.*, 2016. New discovery of Nanhuaian rift system in southwestern Tarim basin and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(3): 825—832. (in Chinese)
- 刘宏,刘东琴,杨轮凯,等,2004. 连续电磁剖面法在山前带勘探中的应用[J]. 石油物探,43(5):492—496.
- Liu H, Liu D Q, Yang L K, *et al.*, 2004. Application of continuous electromagnetic profiling in exploration in foothill belt[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 43(5): 492—496. (in Chinese)
- 邱玉超,罗冰,夏茂龙,等,2019. 四川盆地长宁地区震旦系—寒武系裂陷槽的发现及其地质意义[J]. 天然气勘探与开发,42(2):22—28.
- Qiu Y C, Luo B, Xia M L, *et al.*, 2019. Discovery and geological significance of Sinian-Cambrian rift trough, Changning area, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 42(2): 22—28. (in Chinese)
- 瞿辰,杨文采,于常青,2013. 塔里木盆地地震波速扰动及泊松比成像[J]. 地学前缘,20(5):196—206.
- Qu C, Yang W C, Yu C Q, 2013. Seismic velocity tomography and Poisson's ratio imaging in Tarim Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 20(5): 196—206. (in Chinese)
- 孙冬胜,李双建,李建交,等,2022. 塔里木与四川盆地震旦系—寒武系油气成藏条件对比与启示[J]. 地质学报,96(1):249—264.

- Sun D S, Li S J, Li J J, *et al.*, 2022. Insights from a comparison of hydrocarbon accumulation conditions of Sinian-Cambrian between the Tarim and the Sichuan basins[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(1): 249-264. (in Chinese)
- 邬光辉, 李浩武, 徐彦龙, 等, 2012. 塔里木克拉通基底古隆起构造—热事件及其结构与演化[J]. *岩石学报*, 28(8): 2435-2452.
- Wu G H, Li H W, Xu Y L, *et al.*, 2012. The tectonothermal events, architecture and evolution of Tarim craton basement palaeo-uplifts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(8): 2435-2452. (in Chinese)
- 吴林, 管树巍, 任荣, 等, 2016. 前寒武纪沉积盆地发育特征与深层烃源岩分布——以塔里木新元古代盆地与下寒武统烃源岩为例[J]. *石油勘探与开发*, 43(6): 905-915.
- Wu L, Guan S W, Ren R, *et al.*, 2016. The characteristics of Precambrian sedimentary basin and the distribution of deep source rock: A case study of Tarim Basin in Neoproterozoic and source rocks in Early Cambrian, Western China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 43(6): 905-915. (in Chinese)
- 向葵, 严良俊, 胡华, 等, 2023. 塔里木盆地前寒武系地层重磁电物性建模及储层激电响应特征[J]. *地球物理学报*, 66(4): 1589-1602.
- Xiang K, Yan L J, Hu H, *et al.*, 2023. Physical modeling of density, susceptibility and resistivity and reservoir IP response characteristics of the Pre-Cambrian formation in Tarim Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 66(4): 1589-1602. (in Chinese)
- 严威, 邬光辉, 张艳秋, 等, 2018. 塔里木盆地震旦纪—寒武纪构造格局及其对寒武纪古地理的控制作用[J]. *大地构造与成矿学*, 42(3): 455-466.
- Yan W, Wu G H, Zhang Y Q, *et al.*, 2018. Sinian-Cambrian tectonic framework in the Tarim Basin and its influences on the paleogeography of the Early Cambrian [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 42(3): 455-466. (in Chinese)
- 杨海军, 陈永权, 潘文庆, 等, 2021. 塔里木盆地南华纪—中寒武世构造沉积演化及其盐下勘探选区意义[J]. *中国石油勘探*, 26(4): 84-98.
- Yang H J, Chen Y Q, Pan W Q, *et al.*, 2021. Study on tectonic and sedimentary evolution during the Nanhua-Middle Cambrian and its significance for subsalt exploration, Tarim Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 26(4): 84-98. (in Chinese)
- 杨文采, 王家林, 钟慧智, 等, 2012. 塔里木盆地航磁场分析与磁源体结构[J]. *地球物理学报*, 55(4): 1278-1287.
- Yang W C, Wang J L, Zhong H Z, *et al.*, 2012. Analysis of regional magnetic field and source structure in Tarim Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(4): 1278-1287. (in Chinese)
- 杨文采, 徐义贤, 张罗磊, 等, 2015a. 塔里木地体大地电磁调查和岩石圈三维结构[J]. *地质学报*, 89(7): 1151-1161.
- Yang W C, Xu Y X, Zhang L L, *et al.*, 2015a. Magnetotelluric investigation and 3D lithospheric structures in the Tarim terrane[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(7): 1151-1161. (in Chinese)
- 杨文采, 张罗磊, 徐义贤, 等, 2015b. 塔里木盆地的三维电阻率结构[J]. *地质学报*, 89(12): 2203-2212.
- Yang W C, Zhang L L, Xu Y X, *et al.*, 2015b. Three dimensional electrical resistivity structures of the Tarim Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(12): 2203-2212. (in Chinese)
- 杨鑫, 徐旭辉, 钱一雄, 等, 2014. 塔里木盆地基底组成的区域差异性探讨[J]. *大地构造与成矿学*, 38(3): 544-556.
- Yang X, Xu X H, Qian Y X, *et al.*, 2014. Discussion on Regional Differences of Basement Composition of the Tarim Basin, NW China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(3): 544-556. (in Chinese)
- 杨鑫, 赵永强, 兰明杰, 等, 2021. 塔里木新元古代原型盆地与深层油气勘探意义[J]. *地质学报*, 95(5): 1426-1447.
- Yang X, Zhao Y Q, Lan M J, *et al.*, 2021. Tarim prototypic basin in Neoproterozoic and its significance for deep-ultra deep oil and gas exploration[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(5): 1426-1447. (in Chinese)
- 于常青, 赵殿栋, 杨文采, 2012. 塔里木盆地结晶基底的反射地震调查[J]. *地球物理学报*, 55(9): 2925-2938.
- Yu C Q, Zhao D D, Yang W C, 2012. Seismic reflection investigations of basement in Tarim basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(9): 2925-2938. (in Chinese)
- 周国晓, 魏国齐, 胡国艺, 等, 2020. 四川盆地早寒武世裂陷槽西部页岩发育背景与有机质富集[J]. *天然气地球科学*, 31(4): 498-506.
- Zhou G X, Wei G Q, Hu G Y, *et al.*, 2020. The development setting and the organic matter enrichment of the Lower Cambrian shales from the western rift trough in Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 31(4): 498-506. (in Chinese)

- 朱光有,陈斐然,陈志勇,等,2016. 塔里木盆地寒武系玉尔吐斯组优质烃源岩的发现及其基本特征[J]. 天然气地球科学,27(1):8—21.
- Zhu G Y,Chen F R,Chen Z Y,*et al.*,2016. Discovery and basic characteristics of the high-quality source rocks of the Cambrian Yuertusi Formation in Tarim Basin [J]. Natural Gas Geoscience,27(1):8—21. (in Chinese)
- 朱光有,曹颖辉,闫磊,等,2018. 塔里木盆地 8 000m 以深超深层海相油气勘探潜力与方向[J]. 天然气地球科学,29(6):755—772.
- Zhu G Y,Cao Y H,Yan L,*et al.*,2018. Petroleum exploration potential and favorable areas of ultra-deep marine strata deeper than 8 000 meters in Tarim Basin [J]. Natural Gas Geoscience,29(6):755—772. (in Chinese)
- 邹才能,杜金虎,徐春春,等,2014. 四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现[J]. 石油勘探与开发,41(3):278—293.
- Zou C N,Du J H,Xu C C,*et al.*,2014. Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian? Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development,41(3):278—293. (in Chinese)
- Chen H L,Lin X B,Cheng X G,*et al.*,2019. The late neoproterozoic sedimentary sequences in the Yutang section southwest Tarim Basin and their tectonic implications and hydrocarbon perspective;Insight from basinology[J]. Precambrian Research,333:105432.
- Deng Y F,Levandowski W,Kusky T,2017. Lithospheric density structure beneath the Tarim basin and surroundings,northwestern China,from the joint inversion of gravity and topography[J]. Earth and Planetary Science Letters,460:244—254.
- Lin B,Zhang X,Xu X C,*et al.*,2015. Features and effects of basement faults on deposition in the Tarim Basin [J]. Earth-Science Reviews,145:43—55.
- Rodi W,Mackie R L,2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion[J]. Geophysics,66(1):174—187.
- Zhang L L,Zhao C J,Yu P,*et al.*,2020. The electrical conductivity structure of the Tarim basin in NW China as revealed by three-dimensional magnetotelluric inversion[J]. Journal of Asian Earth Sciences,187:104093.

(责任编辑:黄维婷)