

引用格式:杨敏,于鹏,朱光有,等.耦合地震约束信息的重磁电联合反演方法及其应用——以塔里木盆地深层地质结构解析为例[J].天然气地球科学,2022,33(1):168-179.

YANG Min, YU Peng, ZHU Guangyou, et al. Gravity-magnetic-magnetotelluric joint inversion method coupled with seismic constraint information and its application: Case study of the analysis of deep geological structure in Tarim Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(1): 168-179.

DOI: 10.11764/j.issn.1672-1926.2021.08.005

耦合地震约束信息的重磁电联合反演方法及其应用

——以塔里木盆地深层地质结构解析为例

杨敏¹, 于鹏², 朱光有¹, 张罗磊², 闫磊¹, 赵崇进², 马德波¹, 陈志勇¹

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;

2. 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200091)

摘要:近年来,塔里木盆地新元古界—寒武系深层成为风险勘探和地质研究关注的焦点和热点。由于盆地8 000 m以深深层地震资料品质差,地层展布及厚度、断裂分布等认识不清楚,制约了对深层勘探领域的评价。以塔里木盆地内的重力数据、磁力数据以及大地电磁数据为基础,结合地表露头、钻井、地震等资料,建立了耦合地震约束信息的重磁电三维联合反演方法,实现了对塔里木盆地深部6~10 km储层的物性结构进行准确刻画;解决了盆地深部古老地层的残余厚度展布、深大断裂发育情况以及盆地不同区块现今地温梯度差异大等地质问题,为塔里木盆地下一步深层勘探提供方向。研究认为:塔里木盆地震旦系—南华系具有相对低—中阻、弱—中等磁性和低密度的物性特征,地层残留厚度主要分布在盆地东北、西南2个方向,其残留厚度范围为500~4 500 m,与目前地震资料预测的厚度相吻合;盆地基底主要发育北东东向、北西向、近东西向3个方向的深大断裂,其控制了盆地“四隆五坳”构造格局和震旦系—南华系残留地层分布;塔里木盆地不同块体地温梯度的差异性与磁性层底(居里面)深度密切相关,同为隆起区,古城地区磁性层底埋深相对于塔中、塔北较浅,但其地温梯度最高。

关键词:深层;重磁电震联合反演;南华系—震旦系;地温梯度;塔里木盆地

中图分类号:TE122.1

文献标志码:A

文章编号:1672-1926(2022)01-0168-12

0 引言

随着四川盆地安岳大气田的发现和塔里木盆地逼近8 000 m勘探的突破^[1-4],深层和古老层系已逐渐成为勘探目标和研究热点^[5]。特别是塔里木盆地深层,寒武系勘探自1997年和4井开始,已经历20多年的历程,截至2020年2月,盆地内已完钻探井22口,除中深1C井、中深5井、柯探1井、轮探1井等在寒武系白云岩中获得油气重要发现外,其他井先后失利,盆地深层勘探较为复杂。近年来研究认为前寒武系古地貌控制着盆地主力烃源岩玉尔

吐斯组的分布,表明盆地深部地质结构影响着深层烃源岩^[6-7],而深层地质结构、深部断裂的发育对深部优质储层的分布及深层油气聚集的影响尚不明确,已成为制约深层勘探的重要因素。针对盆地深层地质结构,前人做了大量基础工作,特别是南华系—震旦系的分布。吴林等^[8]基于二维地震、钻井、露头等资料,分析了塔里木新元古代盆地发育特征;陈永权等^[9]根据二维地震解释成图,分析了柯坪运动前后的构造格局变化,以此解决生烃凹陷的问题等。然而常规地震勘探信号传播到8 000 m以深深层时,地震波能量弱、信噪比低,解释结果因人而

收稿日期:2021-05-30;修回日期:2021-08-03;网络首发日期:2021-12-31.

基金项目:中国石油天然气股份有限公司重大科技项目“深层烃源岩形成与分布”(编号:2018A-0102);“古老碳酸盐岩油气成藏分布规律与关键技术”(编号:2019B-04);国家自然科学基金项目“下寒武统黑色页岩中汞含量异常及其对烃源岩形成环境的指示”(编号:42073068)联合资助。

作者简介:杨敏(1987-),女,四川阆中人,工程师,硕士,主要从事地震地质综合解释研究。E-mail: yangmin_tlm@petrochina.com.cn.

异,多解性很强^[10],在一定程度上不能满足深层震旦系—南华系地层分布刻画的分辨率和精度要求。针对塔里木盆地开展的地球物理研究多采用单一地球物理方法或大尺度地质结构的反演解释^[11-18],在一定程度上还不能准确揭示塔里木盆地深部地层的展布情况,而且单一地球物理方法在反演和解释上往往存在多解性。因此,结合前人的研究成果,本文通过二维地震解释得到寒武系以上地层信息,以此为约束,运用大地电磁和重磁资料开展三维联合反演解释,有效刻画盆地的基底结构与深层震旦系—南华系的残留地层分布,解决盆地深大断裂发育情况以及现今地温梯度差异性地质问题,为盆地下一步勘探提供借鉴意义。

1 重磁电震三维联合反演方法

1.1 耦合地震约束信息的重磁电三维联合反演方法

由于单一地球物理方法在解决地下复杂地质问题的能力上存在局限性和多解性,因此联合反演方法近年来一直是地球物理研究的热点^[19]。为解决地震速度模型难以加入到重磁电联合反演过程中等问题,笔者引入了一种新的重磁电震联合反演方法^[19],其目标函数可表示为:

$$P^a(m_1, m_2, m_3) = \gamma_1 \varphi_1(m_1) + \gamma_2 \varphi_2(m_2) + \gamma_3 \varphi_3(m_3) + \alpha_1 s_1(m_1) + \alpha_2 s_2(m_2) + \alpha_3 s_3(m_3) + \lambda_1 \tau(m_r, m_1) + \lambda_2 \tau(m_r, m_2) + \lambda_3 \tau(m_r, m_3) + \lambda_4 \tau(m_1, m_2) + \lambda_5 \tau(m_1, m_3) + \lambda_6 \tau(m_2, m_3) \quad (1)$$

$$\begin{cases} P_n^a(m_1, m_2^{n-1}, m_3^{n-1}) = \varphi_1^n(m_1) + \alpha_1^n s_1^n(m_1) + \lambda_1^n \tau(m_r^{n-1}, m_1) + \lambda_4^n \tau(m_1, m_2^{n-1}) + \lambda_5^n \tau(m_1, m_3^{n-1}) \\ P_n^a(m_1^{n-1}, m_2, m_3^{n-1}) = \varphi_2^n(m_2) + \alpha_2^n s_2^n(m_2) + \lambda_2^n \tau(m_r^{n-1}, m_2) + \lambda_4^n \tau(m_1^{n-1}, m_2) + \lambda_6^n \tau(m_2, m_3^{n-1}) \\ P_n^a(m_1^{n-1}, m_2^{n-1}, m_3) = \varphi_3^n(m_3) + \alpha_3^n s_3^n(m_3) + \lambda_3^n \tau(m_r^{n-1}, m_3) + \lambda_5^n \tau(m_1^{n-1}, m_3) + \lambda_6^n \tau(m_2^{n-1}, m_3) \end{cases} \quad (3)$$

该优化方案使得各方法的数据误差拟合项和模型稳定泛函项相对独立,而模型耦合项则是在多种方法之间交互同步进行计算,即将各方法的初始模型或第 $n-1$ 次模型参数代入本方法的第 n 次反演的子反演过程中,然后基于区域模型矢量余弦相似度耦合的反演进行优化,最后按收敛条件判断是否达到迭代条件,若满足则终止迭代,若不满足则返回重新迭代。该优化方式有 2 个特点:一是各子反演系统能根据自身的反演能力来独立地选取不同的权重因子,提高了整体的反演分辨率;二是各目标函数中加入了地震速度模型项,从而实现了重

式(1)中: $m_i(i=1, 2, 3)$ 表示重磁电模型; m_r 即已知的地震速度模型; $\lambda_i(i=1, 2, \dots, 6)$ 为不同模型耦合项的权重因子; $\varphi_i(m_i)(i=1, 2, 3)$ 为数据误差泛函项; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ 为重磁电数据拟合项权重; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 为重磁电模型泛函项权重; $\tau(m_1, m_2)$ 为构建 2 种物性存在关联的耦合泛函项,如目前广泛应用的交叉梯度耦合等^[20-30]。

不同于交叉梯度耦合,我们采用的模型耦合项为^[31]:

$$\tau(m^{(1)}, m^{(2)}) = 1 - \cos^2 \theta_{12}, \cos \theta_{12} = \frac{M^{(1)} \cdot M^{(2)}}{\eta^{(1)} \cdot \eta^{(2)}} \quad (2)$$

式中: M 代表指定模型耦合区域的模型矢量变化; $\cos \theta_{12}$ 为模型矢量归一化点积即区域余弦相似度; $|\eta^{(i)}| = \max\{|M^{(i)}|, \eta_i^{\min}\}, \eta_i^{\min} > 0, \eta_i^{\min}$ 为避免分母奇异性的小值,可参考 MOLODTSOV 等^[29]标准来确定。

从式(2)可以看出,该约束的本质在于约束区域模型变化的点积平方趋于 1,即让 2 种物性的变化趋于相关来达到耦合区域构造一致的目的,同时其中一种物性不存在相对变化时可避免对另外一种物性产生影响。这种耦合方式解决了常规所用的交叉梯度耦合方式法容易产生畸变且难以融合地震速度模型等问题,使联合反演更适合复杂模型,其实用性进一步提高^[19-20]。

针对目标函数的优化问题,本文将式(1)分为多个子反演过程,子反演过程交替进行,且各反演过程相对独立,从而解决了目标函数的优化问题^[32]。如式(3)所示:

磁电震联合反演^[19]。

1.2 代表性地质—物理模型试验

岩石物性是地球物理解释的基础。综合测井资料和前人在塔里木盆地岩石物性的工作成果^[14-16],统计了塔里木盆地电阻率、密度、磁化率和速度的变化规律(表 1)。塔里木盆地岩石物性的变化特征可总结为,地层整体由新到老,速度、电阻率、密度和磁化强度由弱变强,震旦系以上速度分层明显。震旦系—南华系具有低—中阻、低—中密、弱—中等磁性特征,南华系以下太古界具有高电阻率(简称“高阻”)、高磁化率(简称“高磁”)、高

表1 塔里木盆地物性统计

Table 1 Statistics of physical properties of Tarim Basin

地质年代	速度/(m/s)	电阻率范围/($\Omega \cdot m$)	密度范围/(g/cm^3)	磁化率范围/(10^{-5} SI)
第四纪—古近纪(Q—E)	2 700~3 200	2~100	2.40~2.60	0~105
白垩纪—石炭纪(K—C)	3 400~4 900	1~50	2.60~2.66	0~140
泥盆纪—志留纪(D—S)	4 700~4 750	1~10	2.66~2.69	0~140
奥陶纪(O)	5 500~5 600	1~400	2.69~2.70	0~20
寒武纪(ϵ)	5 100~6 000	1~250	2.69~2.70	0~15
震旦纪(Z)	4 000~4 500	1~150	2.7~2.72	0~220
南华纪(Nh)	4 300~4 800	10~200	2.72~2.73	0~400
青白口纪—太古代(Qn—Ar)	6 500~7 000	10~1 000	2.73~2.95	400~2 000

密度(简称“高密”)“三高”特征。这种物性差异为通过联合反演方法确定震旦系—南华系的分布提供了依据。

为验证重磁电震联合反演方法对塔里木盆地地质模型的适用性,基于塔里木盆地 OGSL-14-50 地质结构剖面的北段(图1,测线位置见图2),参考上述岩石物性依据(表1),建立了研究区简化的重磁电正演模型(图3)。常规地震资料解释基本解决了塔里木盆地寒武系以上地层的分布问题,因此模

型试验中已知条件是寒武系以上地层模型,反演目标是震旦系—南华系及其下伏的基底展布。

重磁电模型联合反演区域大小为沿测线方向 420 km,测点间距均为 2 km。大地电磁深度按对数等间距剖分 66 层至 100 km,采用频率为 0.000 5 Hz 到 320 Hz 共 40 个,正演数据中加入 5% 高斯噪音。重磁模型正反演的深度网格剖分间距为 0.1 km,计算深度至 15 km,网格数为 210×150 ,正演数据中加入 5% 高斯噪音。

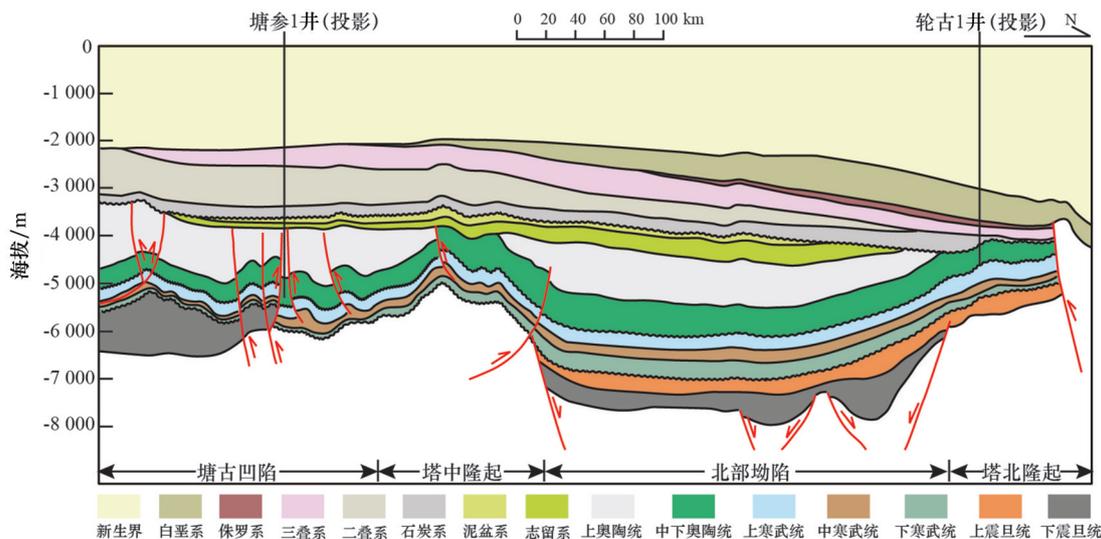


图1 塔里木盆地 OGSL-14-50 地质剖面

Fig.1 Geological profile of OGSL-14-50 in Tarim Basin

单一和联合的电阻率反演初始模型为 $500 \Omega \cdot m$ 半空间,重力反演初始模型为从 $2.4 g/cm^3$ 到 $2.75 g/cm^3$ 的梯度模型,磁法反演初始模型为从 $0.002 A/m$ 到 $0.08 A/m$ 的梯度模型。单一和联合反演结果如图3所示。

从图3可以看出,单一反演只能反映从浅至深渐变的物性特征,而耦合浅层地震约束的重磁电联合反演结果明显刻画出了震旦系—南华系目标地

层的分布,提高了深层目标综合勘探的可靠性。该模型试验验证了联合反演方法在解决超深层目标层位中可以发挥作用。

2 塔里木盆地重磁电震联合反演

2.1 地球物理实际资料状况

本文以塔里木盆地 2 922 个大地电磁测点^[18-20,31](图2)、全区 1:20 万的重磁异常资料(图4)、以及寒

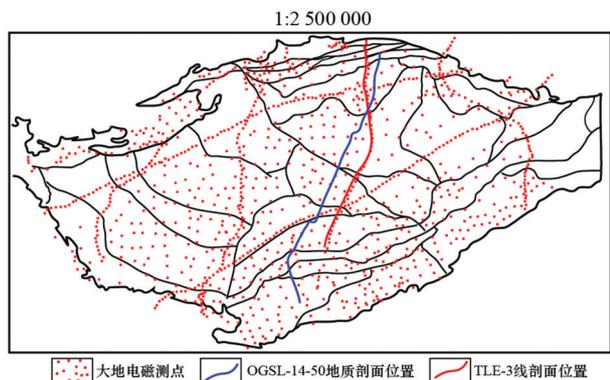


图2 塔里木盆地大地电磁测点分布

Fig.2 Distribution map of magnetotelluric survey points in Tarim Basin

武系以上地震层位资料为基础,开展三维重磁电联合反演。其中,地震层位从浅至深分别是白垩系顶面 T8、泥盆系顶面 Tg22、奥陶系顶面 Tg51、寒武系顶面 Tg6 和寒武系底界 Tg8。

2.2 耦合地震约束的三维重磁电联合反演结果

本文联合反演的目的是反演塔里木盆地震旦系—南华系残留地层厚度。笔者采用以地震信息为约束的重磁电三维联合反演技术,对收集到的塔里木盆地重磁电数据进行了联合反演。

重磁电初始模型的建立是联合反演的基础。大地电磁反演的初始模型是二维电磁反演的结果,

正反演水平和纵向网格数为 $259 \times 147 \times 66$;重力反演初始梯度模型为从 2.4 g/cm^3 线性增加到 3.3 g/cm^3 ,其正反演水平和纵向网格数为 $259 \times 147 \times 101$;磁法反演初始模型为 0 A/m ,反演网格大小同重力一致^[19]。

三维联合反演结果的切片见图5,分别表示了电阻率、磁化强度和密度在深度 10 km、12 km 和 14 km 的变化,反映了塔里木盆地深部元古界至太古界渐变的物性特征。从图5中可以看出,电阻率、密度、磁化强度3类物性都表现为随深度的增加而增加,具有很好的一致性,这也为下一步盆地深部地质结构解译提供了可能性。

3 地质应用

3.1 塔里木盆地震旦系—南华系残留厚度分布预测

3.1.1 典型剖面的震旦系—南华系残留地层分布特征

通过地震约束的联合反演可以有效地预测塔里木盆地震旦系—南华系厚度,以大地电磁 TLE-3 线的三维联合反演结果为例来说明目的层反演效果和预测依据。TLE-3 测线[图2中红线]与前述模型试验中应用的 OGSL-14-50 地质剖面近似重合[图2中蓝线]。图6(a)—图6(c)中的黑实线为寒武系以上地震约束界面,由地表往下依次表示泥盆系

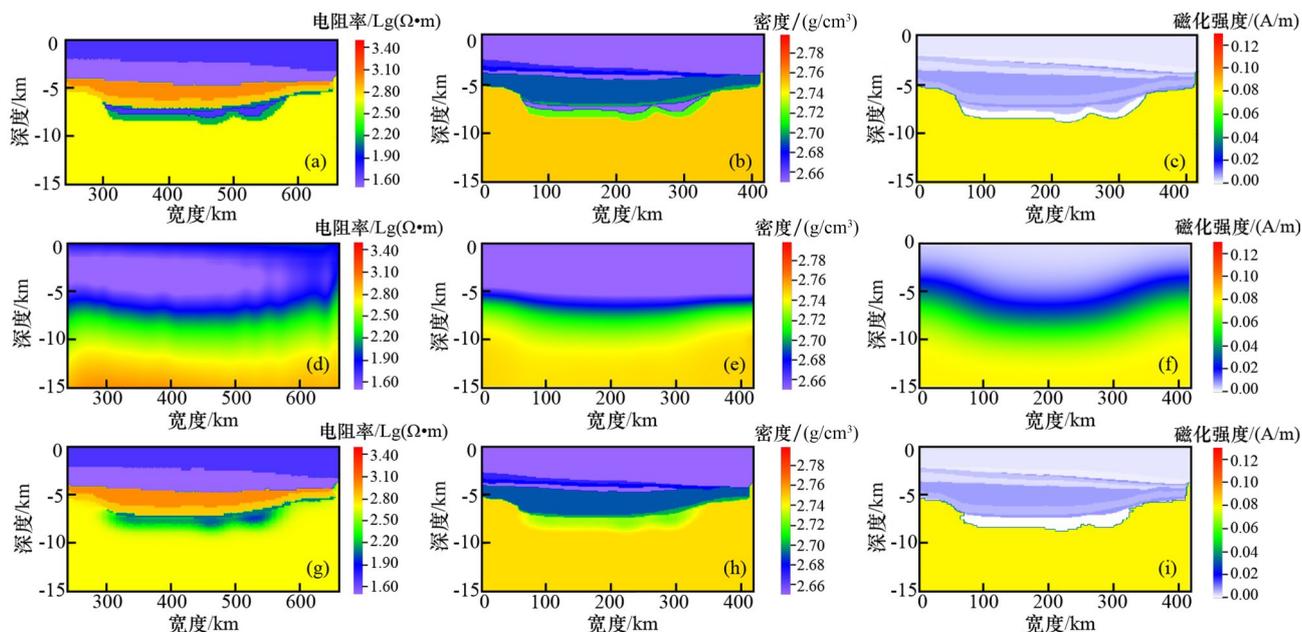


图3 塔里木盆地重磁电正演模型及其单一和联合反演结果

Fig.3 Gravity-magnetic-magnetotelluric forward modeling, its single inversion results and joint inversion results in Tarim Basin

(a)电阻率正演模型;(b)密度正演模型;(c)磁化强度模型;(d)电阻率单一反演结果;(e)密度单一反演结果;
(f)磁化强度单一反演结果;(g)电阻率联合反演结果;(h)密度联合反演结果;(i)磁化强度联合反演结果

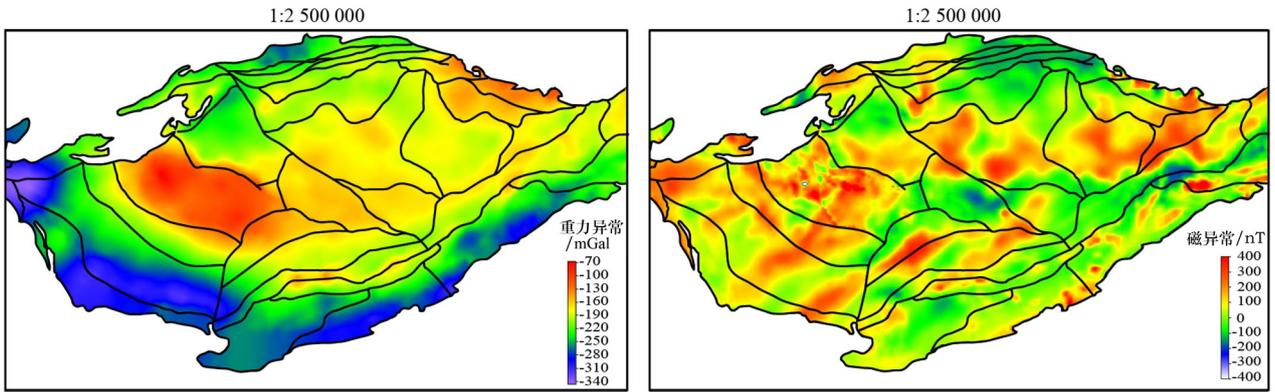


图4 塔里木盆地布格重力异常(a)与化极磁异常图(b)

Fig.4 Bouguer gravity anomaly (a) and geochemical magnetic anomaly (b) in Tarim Basin

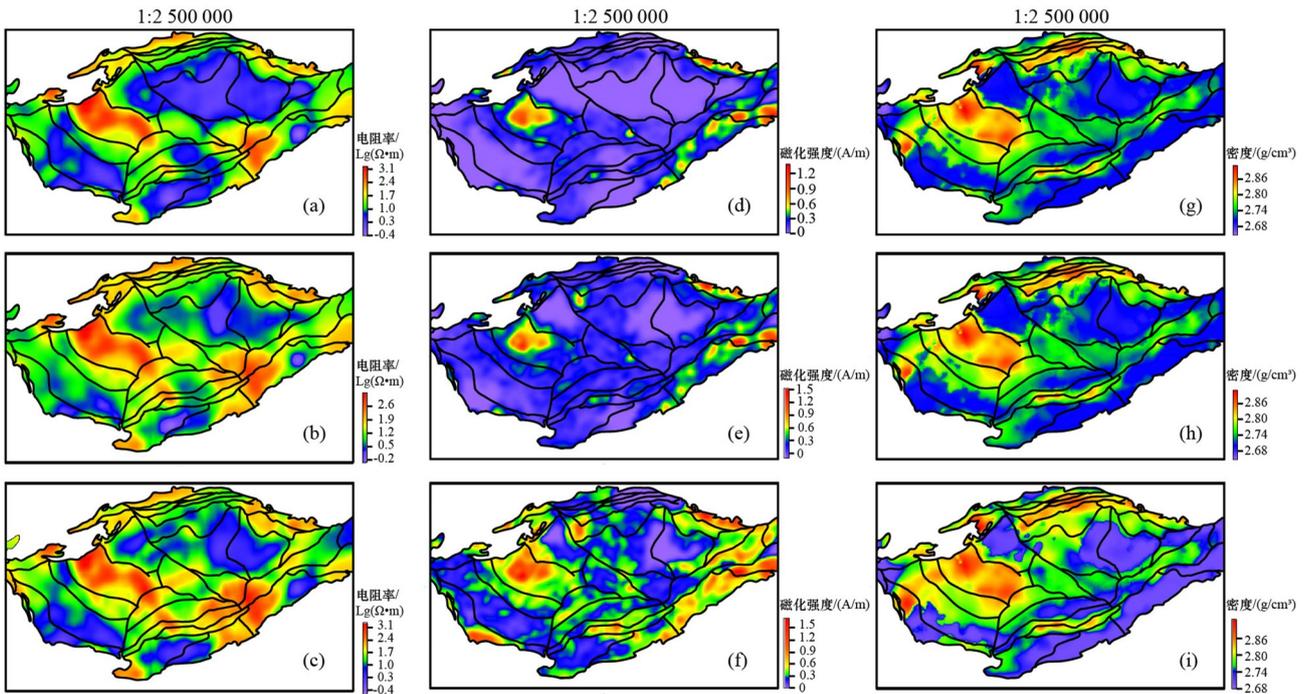


图5 重磁电三维联合反演结果切片

Fig.5 Slices of results of 3D joint inversion of gravity, magnetic and magnetotelluric

(a)、(b)、(c)分别为电阻率反演结果 10 km、12 km、14 km 切片图;(d)、(e)、(f)为磁化强度反演结果 10 km、12 km、14 km 切片图;
(g)、(h)、(i)为密度反演结果 10 km、12 km、14 km 切片图

顶面、奥陶系顶面、寒武系顶面和寒武系底界。反演结果表明,在寒武系与深部相对高阻、高磁和高密基底之间存在一套明显的相对低—中阻、弱—中等磁性和低密的地层分布,结合物性统计规律该套地层推断解释为震旦系—南华系分布(图6中的虚线表示震旦系—南华系底界)。

3.3.2 塔里木盆地震旦系—南华系残留地层分布

以剖面推断的综合物性特征为依据,提取了寒武系之下三维联合反演的高阻、高磁和高密基底顶面埋深(图7),该图基本反映了前南华系变质基底

的起伏变化,在宏观区域构造格架上体现了高阻、高磁和高密的基底物性结构存在较强的一致性。

将三维联合反演结果的高阻、高磁和高密变质基底顶面埋深[图7(b)—图7(d)]与地震寒武系底界埋深[图7(a)]相减,提取相对低—中阻、低—中密、弱—中等磁性地层的厚度来预测盆地震旦系—南华系残留地层厚度的分布,揭示了塔里木盆地这套目的层的主要分布区域[图8(a)]。

从图8(a)中可见,震旦系—南华系残留厚度主要分布在盆地东北、西南2个方向,即塔北—满加尔

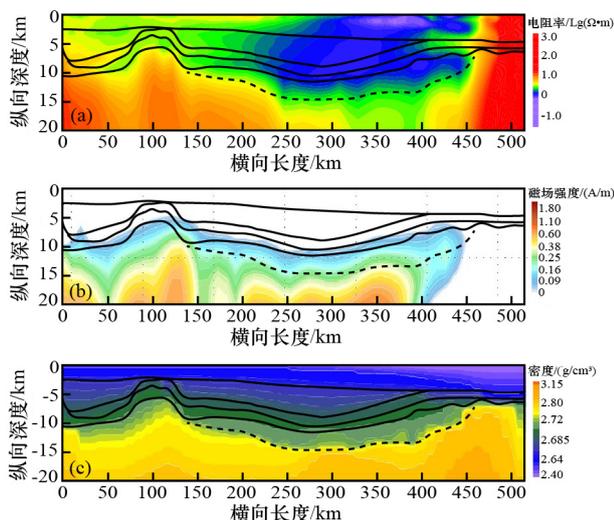


图6 大地电磁 TLE-3 线重磁电联合反演结果

Fig. 6 Gravity-magnetic-magnetotelluric joint inversion result of magnetotelluric TLE-3 line

(a)大地电磁联合反演结果;(b)磁化强度联合反演结果;(c)密度联合反演结果(图中实线为泥盆系顶面、奥陶系顶面、寒武系顶面和寒武系底的已知地震约束,虚线为推断解释的震旦系—南华系底)

北部坳陷区和塔西南坳陷区;地震资料表明,塔里木盆地南华纪—震旦纪为下断上坳型盆地,南华纪为裂谷型盆地,震旦纪为坳陷型盆地[图8(b)—图8(d)]。通过联合反演的厚度图与地震剖面的对比,可以看出在柯坪地区[图8(b)]、塔西南地区[图8(c)]、满加尔坳陷[图8(d),图8(e)]均沉积较厚的南华系—震旦系,其残留厚度范围为500~4 500 m,与目前地震资料预测的厚度相吻合。

笔者将推测的震旦系—南华系以及其下伏地层的电阻率、密度和磁化强度物性值进行了统计(图9),可以看出基底地层具有明显的相对高阻、高密和中—高磁特征,其上覆的地层物性与震旦系—南华系物性统计规律也基本一致,具有相对低—中阻、弱—中等磁性和低密的地层分布。统计特征说明了目标层推测依据充分,也证明了联合反演能够对震旦系—南华系残留地层的分布进行刻画。

3.2 深大断裂特征刻画

受断裂活动的影响,深大断裂两侧地质体的物性(如密度、磁化率、电阻率)往往存在差异,在重磁电异常上呈现出明显特征,出现异常梯度带、线性异常带等^[33]。为进一步揭示深部断裂对震旦系—南华系残留地层的控制作用,利用提出的重磁位场边界刻画技术^[34],对密度三维联合反演的9 km和12 km深度的密度水平切片进行了密度梯度变化极值特征刻画,以表征不同深度密度体接触的边界或

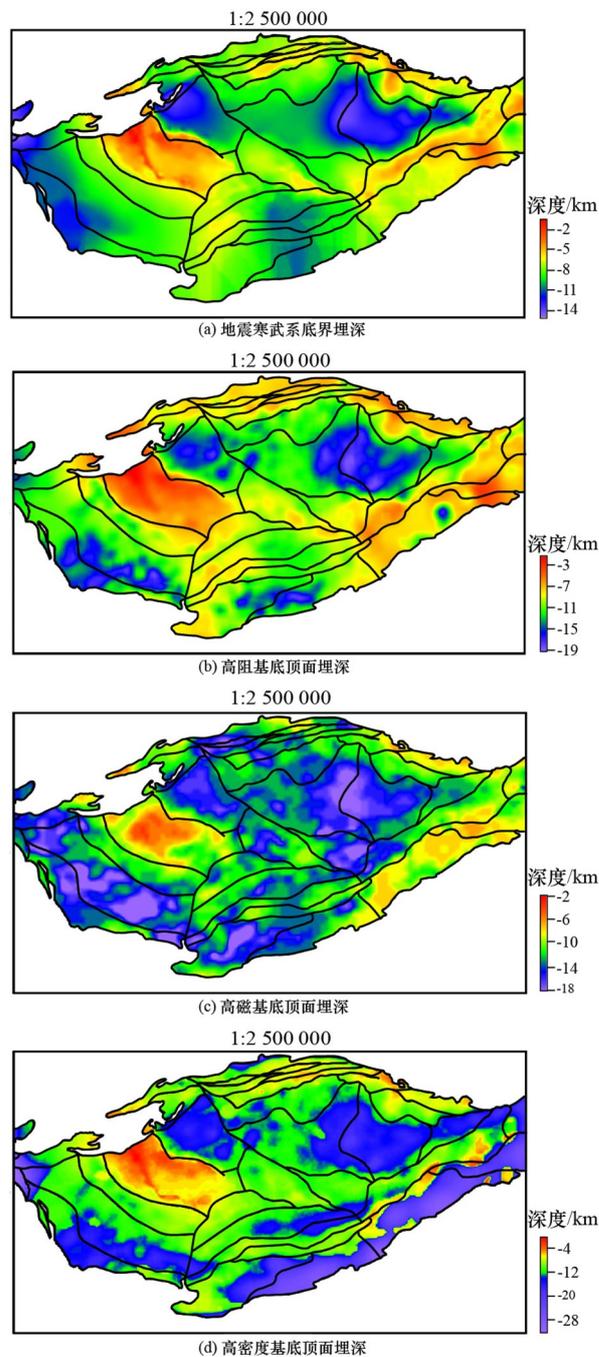


图7 塔里木盆地前南华系基底埋深

Fig.7 Burial depth of pre Nanhua basement in Tarim Basin

断裂特征(图10)。

从图10看出,塔里木盆地基底主要发育NEE向、NW向和近EW向3组断裂,控制了盆地“四隆五坳”构造格局。其中,NEE向断裂规模较大,最大延伸长度可达800 km,主要分布在盆地东南地区;NW向断裂主要分布在盆地西南部;近EW向断裂则在盆地北部。通过综合分析断裂展布特征,认为

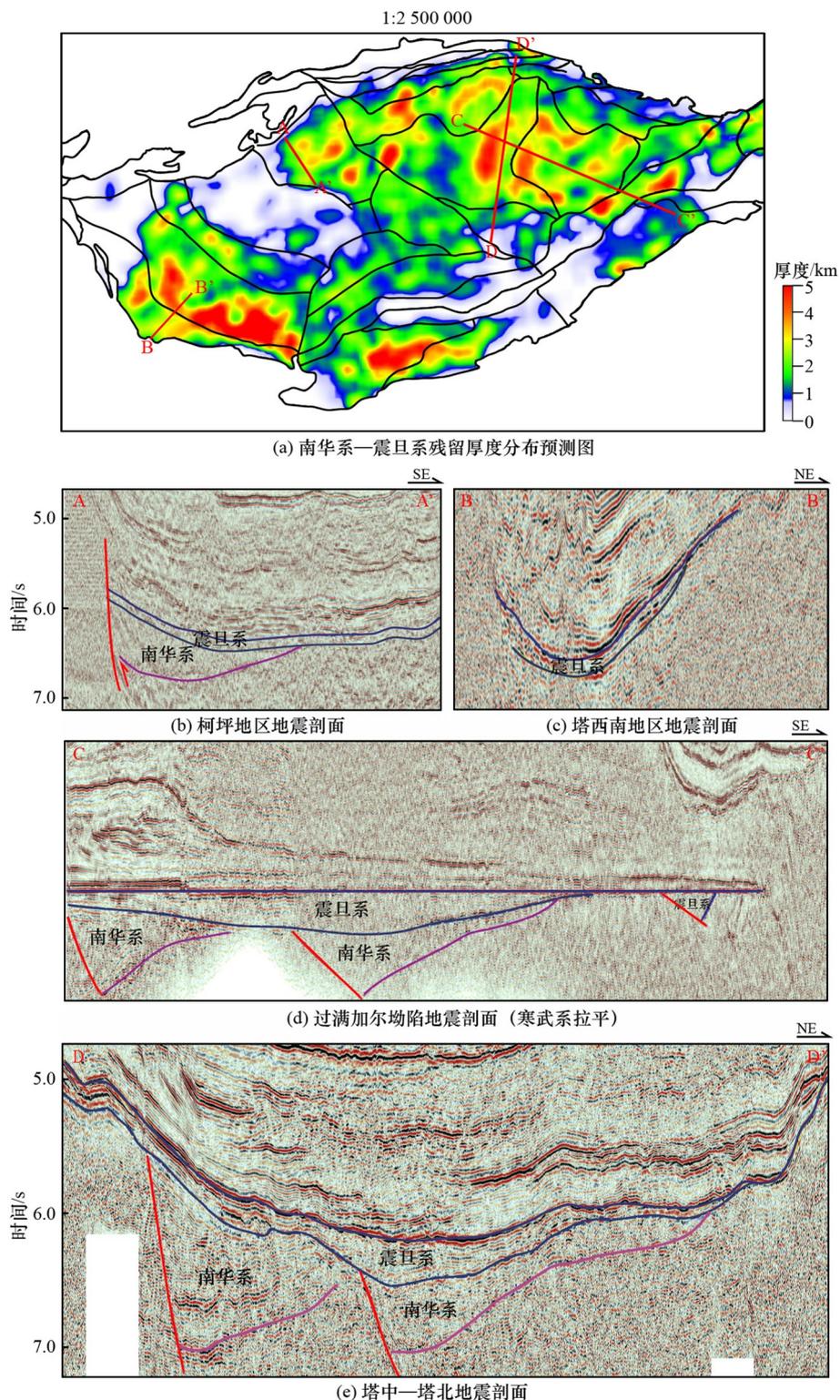


图8 震旦系—南华系残留厚度分布预测图及地震剖面

Fig. 8 Prediction map of residual thickness distribution of Sinian-Nanhua system and seismic profiles

盆地南部NW向断裂主要控制南部震旦系—南华系地层沉积中心,北部震旦系—南华系地层沉积中心则受控于北部NW向、NEE向、近EW向3组深大断裂(图11)。

3.3 塔里木盆地地温场特征及影响因素

3.3.1 塔里木盆地现今地温场特征

塔里木盆地油气相态复杂多样,除了与油气次生地球化学作用和多期充注成藏有关外^[35],不同区

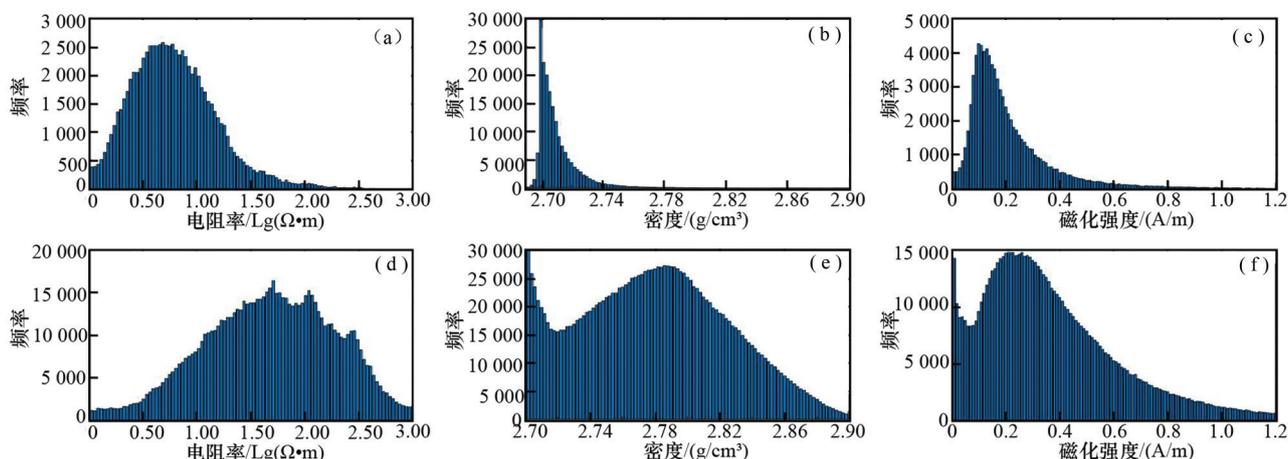


图9 震旦系—南华系及其下伏地层物性分布统计直方图

Fig.9 Statistical histogram of physical property distribution of Sinian-Nanhua system and its underlying strata

(a)、(b)、(c)分别为震旦系—南华系的电阻率、密度和磁化强度分布;(d)、(e)、(f)为下伏地层对应的电阻率、密度和磁化强度分布

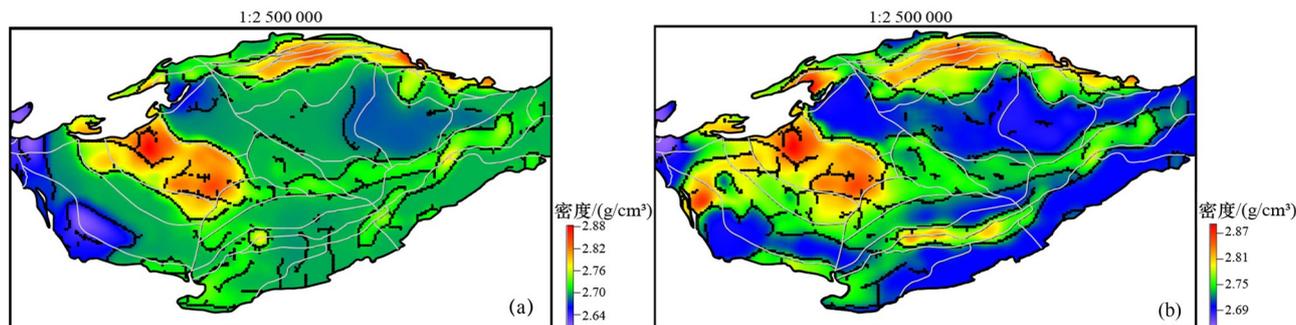


图10 联合反演9 km (a)和12 km (b)密度深度切片提取的断裂特征(图中黑色线条)

Fig.10 Fracture features extracted by joint inversion of density depth slices at 9 km(a) and 12 km(b) (black lines in the figure)

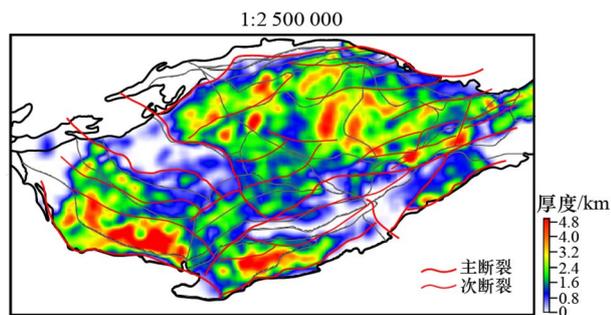


图11 震旦系—南华系的深大断裂展布与地层残余厚度叠合图

Fig.11 Superposition map of Sinian-Nanhua deep and large faults distribution and stratum residual thickness

块地温梯度的巨大差异,也是控制流体相态的一个重要原因。依据塔里木盆地不同构造区钻井测试温度数据,建立了不同构造区地层温度埋深的相关关系图(图12),可以看出钻井温度与深度呈较好的正相关关系,表明现今地温场具有典型的传导型特点。其中,塔里木盆地最大井温为古城9井井底温

度,埋深7 300 m对应地层温度为185℃。塔东古城地区地温梯度相对其他构造区明显偏高,地温梯度约为3℃/100 m。而塔中和塔北地区地温梯度相近,比古城地区略低,表现为约2℃/100 m^[36]。塔西南地区整体地温随深度增加而增大,但相关性不那么明显,地温梯度介于前面提到的两者之间。虽然地温梯度大小和数据点的多少有关系,但仍然可以看出古城地区相对塔中及塔北地区具有较高的地温梯度,盆地内不同区块地温梯度表现出明显的横向变化特征。

3.3.2 塔里木盆地现今地温场影响因素分析

地质体所在的大地构造背景和深部动力学过程是其现今地温特征的一级控制因素。沉积盖层相对基岩岩石具有较低的岩石热导率,这一差异形成热折射效应,热流聚集于隆起区,使得隆起区的地温梯度相对坳陷区较高。但同为隆起区,塔中、塔北及塔东(古城)地区仍存在差异。根据前人研究,塔里木盆地前寒武系具有不同年代、不同类型

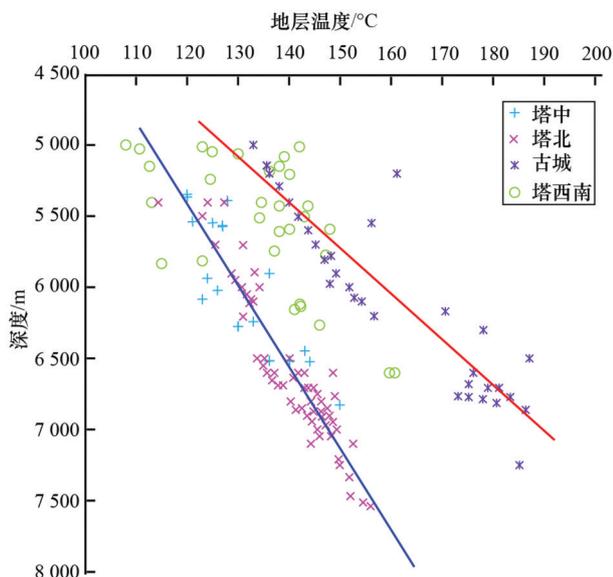


图12 井温与深度关系

Fig.12 Relationship between well temperature and depth

的基底结构^[37]。其中,塔中和塔东古城地区主要为南部新元古代早—中期岩浆岩与变质岩基底,塔北则主要为北部中—新元古代中浅变质岩基底。塔北地区相对塔中、古城地区具有较低的地温场分布,可能与其位于较新的岩浆岩与变质岩基底之上有关。另外,地温场的分布与断裂、构造热事件等相关。断裂特别是高角度大断裂的存在,为深部热源物质和其他热能向上运移提供了通道和输导路径,使得局部地温场升高^[38-39]。考虑到断裂在塔北、塔中及古城地区均较为发育,所以断裂不是地温场差异的主要原因,而且二叠纪岩浆活动热事件(—250 Ma)距离现今极为久远,其引发的热异常早已消失殆尽,对现今地温场的影响也较小。

由于磁性层底面深度(居里面)变化特征能较好地反映深部岩石圈地温梯度变化规律^[40]。因此,根据磁化强度三维反演结果,提取了塔里木盆地磁性层底的深度范围(图13)。从图13中可以看出,塔北地区磁性层底埋深范围为20~48 km,塔中地区磁性层底埋深为24~50 km,古城地区磁性层底深度范围为16~44 km。塔东古城地区相对于塔北、塔中地区居里面埋深较浅,导致热流迅速传递到上覆盖层,从而塔东古城地区地温梯度相对较高。

4 结论

(1)本文在充分利用寒武系以上地震资料约束下,首次对塔里木盆地开展了重磁电三维联合反

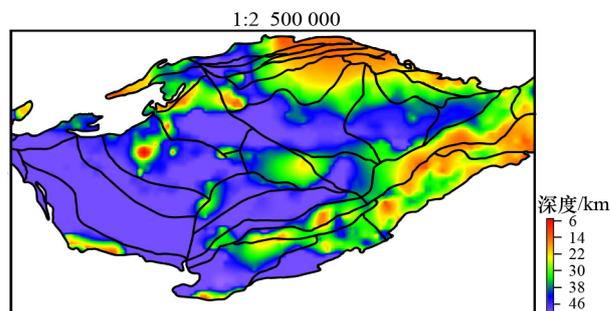


图13 塔里木盆地磁性层底深度

Fig.13 Depth map of the magnetic bottom of the Tarim Basin

演,获得了研究区电阻率、磁化强度和密度三维结构。相比于传统单一非地震反演,耦合地震信息的重磁电三维联合反演减少了反演多解性,提高了深层地质体刻画能力。

(2)震旦系—南华系具有相对低—中阻、弱—中等磁性和低密的物性特征,地层残留厚度主要分布在盆地东北向、西南向2个方向,其残留厚度范围为500~4500 m,与目前地震资料预测的厚度相吻合。盆地基底主要发育北东东向、北西向、近东西向3个方向的深大断裂,深大断裂控制了盆地“四隆五坳”构造格局和震旦系—南华系残留地层的分布。

(3)塔里木盆地不同块体地温梯度的差异性与磁性层底(居里面)深度密切相关。同为隆起区,古城地区磁性层底埋深相对于塔中、塔北地区较浅,其地温梯度最高。

参考文献(References)

- [1] 魏国齐,沈平,杨威,等.四川盆地震旦系大气田形成条件与勘探远景区[J].石油勘探与开发,2013,40(2):129-138.
WEI G Q, SHEN P, YANG W, et al. Formation conditions and exploration prospects of Sinian large gas fields, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(2): 129-138.
- [2] 邹才能,杜金虎,徐春春,等.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,2014,41(3):278-293.
ZOU C N, DU J H, XU C C, et al. Formation distribution resource potential prediction and discovery of Sinian-Cambrian super-giant gas field, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 278-293.
- [3] 汪泽成,姜华,王铜山,等.四川盆地桐湾期古地貌特征及成藏意义[J].石油勘探与开发,2014,41(3):305-312.

- WANG Z C, JIANG H, WANG T S, et al. Paleogeomorphology formed during Tongwan tectonization in Sichuan Basin and its significance for hydrocarbon accumulation[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(3): 305-312.
- [4] ZHU G Y, WANG T S, XIE Z Y, et al. Giant gas discovery in the precambrian deeply buried reservoirs in the Sichuan Basin, China: Implications for gas exploration in old cratonic basins[J]. *Precambrian Research*, 2015, 262: 45-66.
- [5] ZHU G Y, MILKOV A V, ZHANG Z Y, et al. Formation and preservation of a large, super-deep ancient carbonate reservoir, the Halahatang Oilfield in the Tarim Basin, China[J]. *AAPG Bulletin*, 2019, 103(7): 1703-1743.
- [6] ZHU G Y, CHEN F R, WANG M, et al. Discovery of the Lower Cambrian high-quality source rocks and deep oil and gas exploration potential in the Tarim Basin, China[J]. *AAPG Bulletin*, 2018, 102(10): 2123-2151.
- [7] 潘文庆, 陈永权, 熊益学, 等. 塔里木盆地寒武统烃源岩沉积相研究及其油气勘探指导意义[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(7): 1224-1232.
- PAN W Q, CHEN Y Q, XIONG Y X, et al. Sedimentary facies research and implications to advantaged exploration regions on Lower Cambrian source rocks, Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(7): 1224-1232.
- [8] 吴林, 管树巍, 任荣, 等. 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*, 2016, 43(6): 905-915.
- WU L, GUAN S W, REN R, et al. 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*, 2016, 43(6): 905-915.
- [9] 陈永权, 严威, 韩长伟, 等. 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*, 2019, 30(1): 39-50.
- CHEN Y Q, YAN W, HAN C W, et al. Structural and sedimentary basin transformation at the Cambrian/Neoproterozoic interval in Tarim Basin: Implication to subsalt dolostone exploration[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019, 30(1): 39-50.
- [10] 丁道桂, 汤良杰, 钱一雄, 等. 塔里木盆地形成与演化[M]. 南京: 河海大学出版社, 1996: 182-253.
- DING D G, TANG L J, QIAN Y X, et al. Formation and evolution of the Tarim Basin[M]. Nanjing: Hehai University Press House, 1996: 182-253.
- [11] 徐鸣洁, 王良书, 钟锴, 等. 塔里木盆地重磁场特征与基底结构分析[J]. *高校地质学报*, 2005, 11(4): 585-592.
- XU M J, WANG L S, ZHONG K, et al. Features of gravitational and magnetic fields in the Tarim Basin and basement structure analysis[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2005, 11(4): 585-592.
- [12] 胥颐, 刘福田, 刘建华, 等. 中国西北大陆碰撞带的深部特征及其动力学意义[J]. *地球物理学报*, 2001, 44(1): 40-47.
- XU Y, LIU F T, LIU J H, et al. Deep features of continental collision belts in northwestern China and their dynamic implications[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2001, 44(1): 40-47.
- [13] 侯遵泽, 杨文采. 塔里木盆地多尺度重力场反演与密度结构[J]. *中国科学(地球科学)*, 2011, 41(1): 29-39.
- HOU Z Z, YANG W C. Multi-scale inversion of density structure from gravity anomalies in Tarim Basin[J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2011, 41(1): 29-39.
- [14] 杨文采, 王家林, 钟慧智, 等. 塔里木盆地航磁场分析与磁源体结构[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(4): 1278-1287.
- YANG W C, WANG J L, ZHONG H Z, et al. Analysis of regional magnetic field and source structure in Tarim Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(4): 1278-1287.
- [15] 杨文采, 徐义贤, 张罗磊, 等. 塔里木盆地大地电磁调查和岩石圈三维结构[J]. *地质学报*, 2015, 89(7): 1151-1161.
- YANG W C, XU Y X, ZHANG L L, et al. Magnetotelluric investigation and 3D lithospheric structures in the Tarim Terrane[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(7): 1151-1161.
- [16] 杨文采, 张罗磊, 徐义贤, 等. 塔里木盆地的三维电阻率结构[J]. *地质学报*, 2015, 89(12): 2203-2212.
- YANG W C, ZHANG L L, XU Y X, et al. Three dimensional electrical resistivity structures of the Tarim Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(12): 2203-2212.
- [17] 向阳. 塔里木盆地大地电磁三维电性结构反演[D]. 上海: 同济大学, 2017: 54-71.
- XIANG Y. MT 3D Electrical Structure Inversion in Tarim Basin[D]. Shanghai: Tongji University, 2017: 54-71.
- [18] ZHANG L L, ZHAO C J, YU P, et al. The electrical conductivity structure of the Tarim basin in NW China as revealed by three-dimensional magnetotelluric inversion[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2020: 187.
- [19] 宋晗, 于鹏, 张罗磊, 等. 超深层地质目标的重磁电震联合反演方法与应用研究[C]// 2020年中国地球科学联合学术年会论文集. 重庆: 中国地球物理学会, 2020: 51-53.
- SONG H, YU P, ZHANG L L, et al. Research on joint inversion method and application of gravity, magnetic, magnetotelluric and seismic for ultra deep geological target[C]// 2020 China Earth Science Joint Academic Annual Conference Proceedings. Chongqing: Chinese Geophysical Society, 2020: 51-53.
- [20] GALLARDO L A, MEJU M A. Characterization of heterogeneous near-surface materials by joint 2D inversion of dc resistivity and seismic data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(13): L1658.
- [21] GALLARDO L A, MEJU M A. Joint two-dimensional DC

- resistivity and seismic travel time inversion with cross-gradients constraints [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(B03311).
- [22] GALLARDO L A, MEJU M A. Joint two-dimensional cross-gradient imaging of magnetotelluric and seismic traveltimes data for structural and lithological classification[J]. *Geophysical Journal International*, 2007, 169(3): 1261-1272.
- [23] GALLARDO L A, MEJU M A. Structure-coupled multiphysics imaging in geophysical sciences [J]. *Reviews of Geophysics*, 2011, 49(1): 1-19.
- [24] GALLARDO L A, FONTES S, MEJU M, et al. Robust geophysical integration through structure-coupled joint inversion and multispectral fusion of seismic reflection, magnetotelluric, magnetic, and gravity images: Example from Santos Basin, offshore Brazil [J]. *Geophysics*, 2012, 77(5): B237-B251.
- [25] DE S M, GOLFRÉ A F, RE S, et al. Multiple-domain, simultaneous joint inversion of geophysical data with application to subsalt imaging [J]. *Geophysics*, 2011, 76(3): R69-R80.
- [26] DOETSCH J, LINDE N, BINLEY A. Structural joint inversion of time-lapse crosshole ERT and GPR traveltimes data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(24): L24404.
- [27] FREGOSO E, GALLARDO L A. Cross-gradients joint 3D inversion with applications to gravity and magnetic data [J]. *Geophysics*, 2009, 74(4): L31-L42.
- [28] MOORKAMP M, HEINCKE B, JEGEN M, et al. A framework for 3-D joint inversion of MT, gravity and seismic refraction data [J]. *Geophysical Journal International*, 2011, 184: 477-493.
- [29] MOLODTSOV DM, KASHTAN B. Joint inversion of seismic and magnetotelluric data with structural constraint based on dot product of image gradients [C]. *SEG Annual Meeting*, 2011: 740-744.
- [30] MOLODTSOV D M, TROYAN V N, ROSLOV Y V, et al. Joint inversion of seismic traveltimes and magnetotelluric data with a directed structural constraint [J]. *Geophysical Prospecting*, 2013, 61(6): 1-11.
- [31] 时波. 耦合约束信息的重磁电联合反演方法研究及其应用 [D]. 上海: 同济大学, 2019: 66-80.
- SHI B. Research and Application of Gravity-magnetic-electric Joint Inversion Method for Coupling Constraint Information [D]. Shanghai: Tongji University, 2019: 66-80.
- [32] 赵崇进. 2D重磁震正则化联合反演研究 [D]. 上海: 同济大学, 2017: 70-91.
- ZHAO C J. Study on Regularization of 2D Gravity-Magnetic-Seismic Joint Inversion [D]. Shanghai: Tongji University, 2017: 70-91.
- [33] 闫磊, 李明, 潘文庆. 塔里木盆地二叠纪火成岩分布特征—基于高精度航磁资料 [J]. *地球物理学进展*, 2014, 29(4): 1843-1848.
- YAN L, LI M, PAN W Q. Distribution characteristics of Permian igneous rock in Tarim Basin-based on the high-precision aeromagnetic data [J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(4): 1843-1848.
- [34] 张旭. 重磁异常三维反演几项关键技术技术研究 [D]. 上海: 同济大学, 2015: 40-60.
- ZHANG X. Research on Several Key Techniques of 3d Gravity and Magnetic Anomaly Inversion [D]. Shanghai: Tongji University, 2015: 40-60.
- [35] ZHU G Y, ZHANG Z Y, ZHOU X X, et al. The complexity, secondary geochemical process, genetic mechanism and distribution prediction of deep marine oil and gas in the Tarim Basin, China [J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 198: 1-28.
- [36] ZHU G Y, HUANG H P, WANG H T. Geochemical significance of discovery in Cambrian reservoirs at Well ZS1 of the Tarim Basin, northwest China [J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29(3): 1332-1344.
- [37] 邬光辉, 李浩武, 徐彦龙, 等. 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*, 2012, 28(8): 2435-2452.
- WU G H, LI H W, XU Y L, et al. The tectonothermal events, architecture and evolution of Tarim craton basement palaeo-uplifts [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(8): 2435-2452.
- [38] 王炳山, 王传刚. 我国晚古生代煤变质古地温场与煤层气赋存条件 [J]. *煤田地质与勘探*, 2000, 28(4): 27-30.
- WANG B S, WANG C G. Relationship between Late Paleozoic geothermal field of coal metamorphism and conservation conditions of coalbed gas in China [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2000, 28(4): 27-30.
- [39] 刘彩波, 胡安焱, 黄景锐, 等. 西安市浅层地温场特征及其影响因素分析 [J]. *地下水*, 2013, 35(2): 30-32.
- LIU C B, HU A Y, HUANG J R, et al. Analysis of the characteristics and influencing factors of shallow geothermal field in Xi'an [J]. *Ground Water*, 2013, 35(2): 30-32.
- [40] 熊盛青, 杨海, 丁燕云, 等. 中国陆域居里等温面深度特征 [J]. *地球物理学报*, 2016, 59(10): 3604-3617.
- XIONG S Q, YANG H, DING Y Y, et al. Characteristics of Chinese continent Curie point isotherm [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(10): 3604-3617.

Gravity-magnetic-magnetotelluric joint inversion method coupled with seismic constraint information and its application: Case study of the analysis of deep geological structure in Tarim Basin

YANG Min¹, YU Peng², ZHU Guangyou¹, ZHANG Luolei², YAN Lei¹,
ZHAO Chongjin², MA Debo¹, CHEN Zhiyong¹

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China;

2. College of Marine Geology and Geophysics, Tongji University, Shanghai 200091, China)

Abstract: In recent years, deep formations of Neoproterozoic-Cambrian in Tarim Basin have become the focus and hotspot of risk exploration and geological studies. Due to the poor quality of seismic data in the depth below 8 000 m of the basin, the formation distribution, thickness and faults distribution are not clear, which restricts the evaluation of the deep exploration area. Based on gravity data, magnetic data and magnetotelluric data collected in the basin, combined with geological data such as outcrop, drilling and seismic data, a three-dimensional joint inversion method for gravity, magnetic and magnetotelluric data is established coupled with conventional seismic information. The method can accurately characterize the physical structures in depths of 6-10 km, and can be used to solve the geological problems such as residual thickness distribution in deep ancient strata, the development of deep faults and the great difference of the present geothermal gradients in different parts of the basin, providing directions for further deep exploration in the Tarim Basin. It is shown that the Sinian to Nanhuan systems in Tarim Basin have the characteristics of relatively low-medium resistivity, weak-medium magnetism and low density, of which residual thickness is mainly distributed in the northeast and southwest directions of the basin, and the residual thickness ranges from 500 m to 4 500 m, which is consistent with the current seismic data. In the basement of the basin mainly develop deep faults in north-east-east, north-west, and near east-west directions, which control the structural pattern of the "Four Uplifts and Five Depressions" in the basin and the distribution of Sinian-Nanhuan residual strata; the difference of geothermal gradients of different blocks in Tarim Basin is closely related to the bottom depth of the magnetic layer. Of the uplift areas, the bottom depth of the magnetic layer in the Gucheng area is shallower than that in Tazhong area or Tabei area, but its geothermal gradient is the highest.

Key words: Deep formation; Gravity-magnetic-magnetotelluric-seismic joint inversion; Nanhuan-Sinian systems; Geothermal gradient; Tarim Basin

Foundation items: The Major Science and Technology Projects of CNPC (Grant No.2018A-0102); the Major Science and Technology Projects of CNPC (Grant No.2019B-04); the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42073068).

《天然气地球科学》2021年度审稿专家名单

同行评议是稿件学术质量控制的重要环节,是学术期刊审稿过程中采用的一种最重要、最普遍的方式。审稿专家是开展同行评议及提升期刊学术质量的关键。经过多年汇聚领域优秀科学家,《天然气地球科学》组建了一支学术水平高、领域覆盖广、工作作风严谨、文字功底好、责任心强、乐于奉献的稳定审稿专家队伍,在论文学术质量控制方面做出了重要贡献。目前,在库专家总数已超过2390人,随投稿数量的增加和报道领域的扩展,审稿专家队伍仍将不断扩充。据统计,2021年度共有375位专家承担了审稿工作,在此对他们所付出的辛勤劳动表示真诚感谢!

以下为审稿专家名单(按姓名音序排列):

白国平 白云来 包洪平 包建平 包书景 鲍志东 卞从胜 蔡春芳 蔡建超 曹 剑 曹思远 曾溅辉
 曾联波 陈安清 陈 冬 陈多福 陈 刚 陈光进 陈国俊 陈红汉 陈建平 陈践发 陈军斌 陈可洋
 陈明强 陈瑞银 陈尚斌 陈世加 陈义林 陈永波 陈永权 程付启 程 鹏 程时清 戴金星 单玄龙
 丁国生 丁文龙 丁晓琪 董大忠 窦立荣 杜启振 耳 闯 范昌育 范存辉 范宜仁 封从军 冯有良
 冯子辉 冯子齐 付 广 刚文哲 高 波 高 岗 高 辉 高建虎 高志前 葛洪魁 耿安松 关文龙
 桂志先 郭 平 郭秋麟 郭彦如 郭召杰 韩继勇 韩剑发 韩双彪 韩中喜 郝乐伟 郝明强 何家雄
 何建华 何幼斌 何佑伟 洪 峰 侯连华 侯明才 胡安平 胡 广 胡国艺 胡俊坤 胡圣标 胡永乐
 胡 勇 黄保家 黄成刚 黄林军 黄全华 黄士鹏 黄玉龙 吉鸿杰 吉利民 纪友亮 贾爱林 贾建称
 贾善坡 贾望鲁 江青春 江为为 姜 波 姜汉桥 姜 华 姜瑞忠 姜维东 姜文亚 姜振学 蒋有录
 蒋裕强 焦存礼 焦伟伟 金 惠 金 强 金晓辉 雷裕红 李 斌 李潮流 李传新 李二庭 李凤杰
 李 刚 李国欣 李建忠 李 剑 李 娟 李 军 李 磊 李庆辉 李荣西 李胜军 李树同 李素梅
 李天太 李文厚 李贤庆 李相博 李相方 李小明 李晓平 李延钧 李 阳 李 勇 李勇明 李友川
 李振生 李志明 李治平 李 忠 梁 榜 梁 冰 廖玉宏 廖泽文 廖志伟 林承焰 林 潼 林玉祥
 刘 波 刘昌岭 刘成林 刘池阳 刘海涛 刘 虎 刘嘉庆 刘金钟 刘敬寿 刘 立 刘启国 刘全有
 刘瑞林 刘世明 刘树根 刘 伟 刘卫群 刘文汇 刘小洪 刘小平 刘钰铭 刘自亮 柳 波 柳少波
 龙胜祥 卢 斌 卢 鸿 卢进才 卢正权 鲁雪松 罗静兰 罗明良 罗 忠 吕宝凤 吕成福 吕修祥
 马安来 马奔奔 马德波 马志欣 米敬奎 苗继军 牟传龙 倪小明 倪新锋 倪云燕 聂海宽 宁伏龙
 潘冬明 潘 懋 潘长春 彭仕必 彭勇民 蒲春生 钱一雄 乔占峰 秦启荣 秦胜飞 秦 勇 邱隆伟
 邱楠生 邱 振 屈红军 任战利 邵 磊 申 建 沈安江 师永民 施立志 施振生 史基安 史建南
 寿建峰 隋微波 孙国强 孙建孟 孙耀庭 谭茂金 谭秀成 汤达祯 唐洪明 唐 俊 唐友军 陶辉飞
 陶 亮 陶小晚 田 兵 田 辉 田 力 田 巍 涂建琪 妥进才 万云洋 汪双清 汪 洋 汪泽成
 王飞宇 王贵文 王红军 王红岩 王 华 王华忠 王汇彤 王家豪 王建功 王建民 王建强 王 杰
 王 南 王璞珺 王起琮 王濡岳 王瑞飞 王社教 王世谦 王卫红 王喜鑫 王晓锋 王秀娟 王玉满
 王云鹏 王志战 王祝文 王作栋 卫延召 位云生 蔚远江 魏国齐 魏祥峰 邬光辉 吴陈君 吴胜和
 吴 伟 吴小奇 吴因业 鲜本忠 向才富 肖 亮 谢庆宾 谢武仁 谢增业 熊 伟 熊 钰 胥洪成
 徐怀民 徐思煌 闫海军 闫建平 闫相祯 严德天 杨 峰 杨 虎 杨 桦 杨 威 杨文新 杨午阳
 杨占龙 杨兆平 杨正明 杨 智 姚光庆 姚素平 姚亚明 叶加仁 伊海生 易同生 殷进垠 尹成明
 尹志军 游利军 于炳松 于兴河 于 洲 袁 超 张昌民 张虎权 张惠良 张建勇 张军华 张磊夫
 张立宽 张立强 张烈辉 张 明 张 鼎 张 鹏 张 琴 张荣虎 张顺存 张 昕 张永庶 张枝焕
 章成广 赵靖舟 赵俊峰 赵力彬 赵孟军 赵 群 赵 跃 郑剑锋 郑 民 郑荣臣 钟大康 钟建华
 钟宁宁 周 蒂 周进高 周世新 周新桂 周瑶琪 朱光有 朱华银 朱建伟 朱如凯 朱扬明 朱友益
 朱玉双 庄锡进 邹姐姐

《天然气地球科学》编辑部

2022年1月