

岑巩页岩气区块高精度磁异常特征及其地质意义^{*}

钱文滔¹, 尹太举^{1*}, 李学森²

(1 长江大学地球科学学院, 湖北 武汉 430100; 2 桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林 541006)

摘要 中国南方地区地表条件复杂, 碳酸盐地层发育, 高阻碳酸盐岩地层阻挡了地震弹性波向下穿透, 难以获取构造、层位, 尤其是深部可靠信息, 导致常规地震勘探方法受到限制。文章基于野外高精度磁法勘探, 采用数据校正、空间变换、导数转换、平滑滤波和正则化滤波等数据处理技术, 分析探测对象磁性差异所引起的磁异常, 对研究区磁性基底埋深进行反演计算。研究结果获得的磁性基底为与中元古界顶界相当的变质岩磁性界面, 深度在2~4 km, 反映了盆地内变质结晶基底的构造形态和起伏特征。另外, 文章初步分析和探讨了引起磁正负异常地质要素, 指出磁负异常与上扬子下寒武统牛蹄塘组页岩气富集区具有很好空间匹配关系。

关键词 地质学; 页岩气; 牛蹄塘组; 磁法勘探; 磁异常; 基底

中图分类号: P631.2²

文献标志码: A

Characteristics of high-precision magnetic anomaly in Cen'gong Block and its geological significance

QIAN WenDao¹, YIN TaiJu¹ and LI XueSen²

(1 School of Earth Science Yangtze University, Wuhan 430100, Hubei, China; 2 College of Earth Science Guilin University of Technology, Guilin 541006, Guangxi, China)

Abstract

As the surface complex conditions in southern China and high-resistance carbonate reservoir, which inhibits the seismic elastic waves from penetrating downwards, it is difficult to identify geological structure and divide target layers, especially detect reliable information about the deep burial depth. This limited the use of conventional seismic exploration methods. Based on high-precision magnetic exploration, the authors used data correction techniques such as data correction, spatial transformation, derivative conversion, smoothing filtering and regularization filtering to analyze the magnetic anomalies caused by the magnetic differences of the detected objects, and to conduct inversion calculation of the buried depth of the magnetic base in the study area. The magnetic substrate obtained in this paper is a metamorphic rock magnetic interface equivalent to the top boundary of the Mesoproterozoic, with a depth of 2 to 4 km, reflecting the structural morphology and undulation characteristics of the metamorphic crystalline basement in the basin. The geological factors causing positive and negative magnetic anomalies have been discussed. It is shown that the magnetic anomaly has a good spatial matching relationship with the shale gas enrichment area in the Lower Cambrian Niutitang Formation.

Key words: geology, shale gas, Niutitang Formation, magnetic exploration, magnetic anomaly, basement

^{*} 本文得到国家自然科学基金项目(编号:41672119)和大型油气田及煤层气开发项目(编号:2016ZX05024-003-004)的联合资助

第一作者简介 钱文滔,男,1986年生,博士研究生,主要从事油气地质勘探与研究工作。Email: qiandurham@gmail.com

^{**} 通讯作者 尹太举,男,1971年生,博士生导师,教授,长期从事沉积储层、层序地层学、油气地质开发和沉积成岩模拟研究工作。

Email: yintaij@yangtzeu.edu.cn

收稿日期 2018-11-09;改回日期 2019-02-02。赵海杰编辑。

页岩气是蕴藏于页岩层中可供开采的天然气资源,在国内外已引起油气界广泛而密切的关注(张金川等,2004;李新景等,2007;邹才能等,2010)。加快页岩气资源战略调查和勘探开发,已成为中国油气资源领域一项重要而迫切的战略任务。贵州铜仁中能天然气有限公司已在贵州岑巩的天星乡钻探了第一口探井“天星1井”,其中寒武系牛蹄塘组为钻探的主要目的层,气测录井证实该层位油气显示较好,表明岑巩地区具有良好的找气前景(聂永生等,2013;冷济高等,2014;梁超等,2012)。

一直以来,对于油气探测只要是用到地球物理方法一般都是选择地震勘探(管志宁,2005)。中国南方地区发育碳酸盐岩,复杂地表条件和高陡构造地层导致常规地震勘探方法的使用受到限制。高阻的碳酸盐岩阻挡了地震弹性波向下穿透,难以获取构造、层位,尤其是深部的可靠信息(Sims et al., 1971; Ward, 1980; 王家林等,1982)。研究区二维地震勘探表明,野外采集的二维地震数据在构造极其复杂的东南部品质差,不能满足地层精细解释工作。另外,研究区天马1井钻探失利也表明,在碳酸盐岩发育区基于二维地震资料来指导全区勘探具有局限性。因此,采取多种物探研究手段对研究区构造格局重新再认识显得尤为重要。

磁法勘探作为一种非地震地球物理方法,通过观测及分析探测对象磁性差异所引起的磁异常,进而研究探测对象在地底下的分布情况(管志宁,2005)。高精度的地磁资料能够详细划分区域地质构造,和加深对沉积拗陷的认识和对其储油环境和油气运移的了解,提高油气预测的准确性。地磁资料经过各种处理后可以识别局部构造,确定基岩起伏形态,是了解盆地基底构造、划分构造单元最有效的地球物理方法之一(杨文采等,2012;刘康等,2014)。

1 地质概况

贵州岑巩区块地处贵州省东部铜仁市的西南部,与湘黔两省三地(黔东南州、铜仁市、怀化市)交接,主体位于贵州省岑巩县内(图1)。岑巩区块构造上主体位于上扬子板块东南缘黔北地区,处于湘鄂西隔槽式褶皱带。研究区早寒武世为深水陆棚沉积环境,水深由南东向北西逐渐变浅(Wang et al., 2016;王濡岳等,2016)。牛蹄塘组页岩在研究区内发育稳定,厚度变化在50~70 m,以黑色碳质页岩和

黑色硅质页岩为主。页岩气区块内地层分布广,从前震旦系到第四系均有不同程度的发育,地层从古到新分别出露有梵净山群、板溪群、震旦系、寒武系的牛蹄塘组、变马冲组、杷榔组、清虚洞组、高台组、娄山关群、奥陶系下统部分层系和第四系黏土层。研究区内主要出露中寒武统,在区块的东北、西北、西南可见前震旦系变质碎屑岩,在东部的水尾、江屯以东可见少量下奥陶统分布。总体来看,研究区核部地层较新,而向着周缘东北方向、西南方向、北西方向地层逐渐变老(程克明等,2009;聂海宽等,2009)。

2 野外磁测、数据处理及磁异常圈定

2.1 野外磁测

研究区褶皱以及断裂构造走向主要以北东向、北北东向为主(聂永生等,2013;冷济高等,2014)。野外磁测测线设计综合考虑了研究区地质构造、钻井以及二维地震勘探测线。岑巩页岩气区块二维地震勘探布置测线2组共15条,地震勘探线间距为4 km,其中,走向北西西-南东向测线7条,走向北东东-南西西向测线8条,2组测线互相垂直,控制整个测区面积960 km²。高精度磁法勘探在研究区域布设2组测线,共10条,测线沿二维地震测线分布,点距200 m,控制面积240 km²。测线WE492和SN500径过研究区主要井位(图1)。

2.2 磁场数据处理

在野外磁测过程中质子磁力仪所读取的数据是测点处地磁场总强度 T ,而研究中需要得到的数据是研究区地磁异常值 ΔT 以及地磁异常场的垂直分量 ΔZ ,为了达到目的需要对野外磁测数据进行处理,其中包括日变改正、正常场改正、高度改正、温度改正和零点校正等(管志宁,2005;高金田等,2005)。对于质子磁力仪来言,这种仪器无零点漂移和温度影响,故无须进行温度改正和零点校正,所以研究区磁测工作主要进行以下几种校正:日变改正、正常场改正、高度改正(张江江,2010;孙伟,2012)。

2.2.1 正常场改正

野外使用的质子磁力仪采取的数据是观测点的总磁场强度,记为 $T(x, y, t)$,而要获得测点的地磁异常值 $\Delta T(t)$,首先要进行处理的就是正常场改正。在数据整理过程中将观测点所观测到的总磁场强度减去测区基点处正常地磁场 $T_0(x, y, t)$,才能得到观测点处未经日变改正的地磁异常值 $\Delta T_1(x, y)$ 。以前通过查询中国地磁图的方法来进行正常场改正,这种方法已

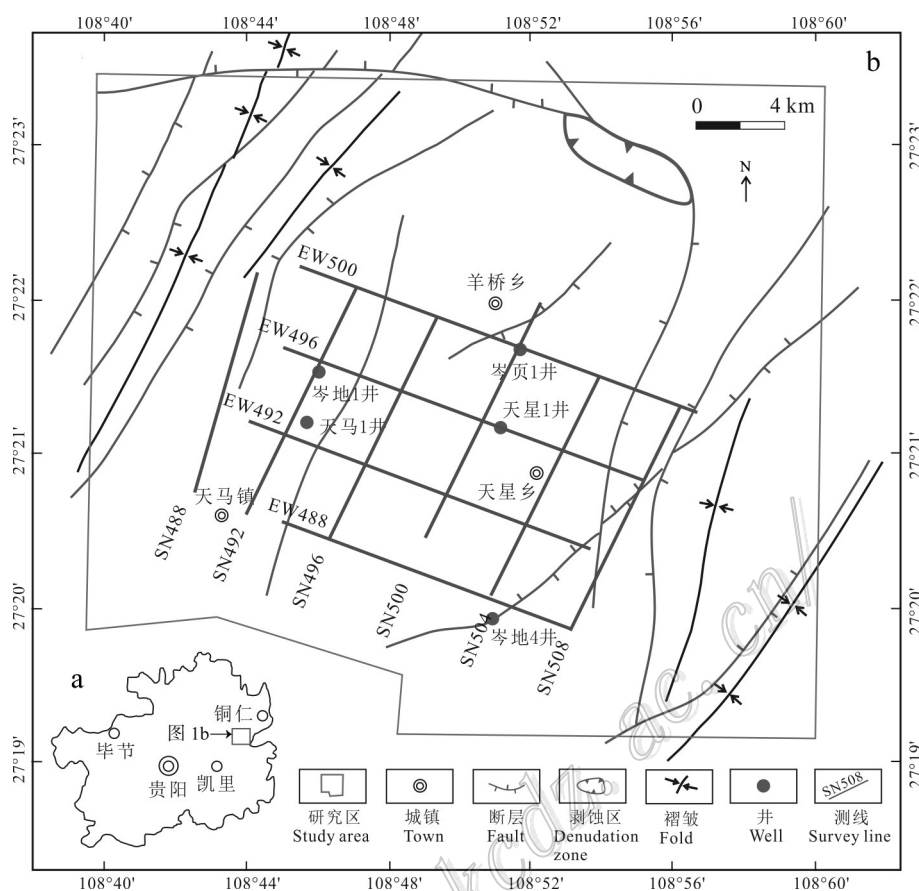


图1 研究区岑巩位置示意图(a)及磁测测线图(b)

Fig. 1 Location of the Cen'gong study area (a) and the magnetic survey lines (b)

然不能满足现代高精度磁法测量的要求,笔者所采用的方法是使用国际地磁参考场模型 IGRF(国际地磁参考场, International Geomagnetic Reference Field),而使用这种方法就不必再做水平梯度改(张刚,2011)。

磁测正常场改正的数学模型表示如下:

$$\Delta T_1(x, y) = T(x, y, t) - T_0(x, y, t)$$

式中: (x, y) 为测点的地理坐标; $T_0(x, y, t)$ 为 t 时刻的正常磁场; $T(x, y, t)$ 为野外观察时刻 t 质子磁力仪的观测值; $\Delta T_1(x, y)$ 为不经过日变改正的地磁异常值。

2.2.2 日变改正

地球上高空大气层的电流体系会对地球的磁场有短周期的影响,这种影响在白天变化大,而在夜间变化小且相对稳定,这种以二十四小时为周期的变化被称作为地磁日变。地磁日变导致的结果是在同一测点上不同时刻所测得的磁场值会发生变化,少则几个纳特(nT),多则达几十纳特(nT),因此,对所测得的数据必须要消除这一部分的影响,这种消除

由于太阳日变化而引起地磁场变化的过程称为日变改正(管志宁,2005)。具体做法是,沿测线测量的磁力仪在每个测点测量时都记录了相应的测量时间,根据测点的测量时间,在日变测量记录中查找相应时刻的日变值,将经过正常场改正后的地磁场值 $\Delta T_1(x, y)$ 减去相应时刻日变值 $\Delta T_0(t)$,便可得到野外上每个测点经过日变改正后的地磁异常值 $\Delta T(x, y)$ 。

野外磁测数据日变改正数学模型表示如下:

$$\Delta T(x, y) = \Delta T_1(x, y) - \Delta T_0(t)$$

式中: $\Delta T_1(x, y)$ 为没有经日变改正的地磁异常值, $\Delta T_0(t)$ 为观察时刻 t 的日变改正量, $\Delta T(x, y)$ 为经过各项校正后的地磁异常值。

2.2.3 磁异常化极

将不在地磁极处的地下磁性体引起的磁异常换算到假设磁性体就位于地磁极处所引起的磁异常称为磁异常化极。这是一理论模型,而在实际中常把斜磁化的异常换算为垂直磁化的这一过程叫着化极(管志宁,2005)。地下的磁性体经过化极后,其空间

位置在地面的投影就能与磁异常等值线图上的极值位置准确对应,另外磁异常的形态会变得相对简单。这样处理的目的在于定性分析以及定量计算,进而使得室内磁异常解译工作更为简单(赵百民等,

2009)。

本次磁测数据处理,使用中国地调局发展研究中心研发的重磁电数据处理与解释软件 RGIS 2014 系统对 ΔT 异常数据进行化极,根据研究区物性资料,选

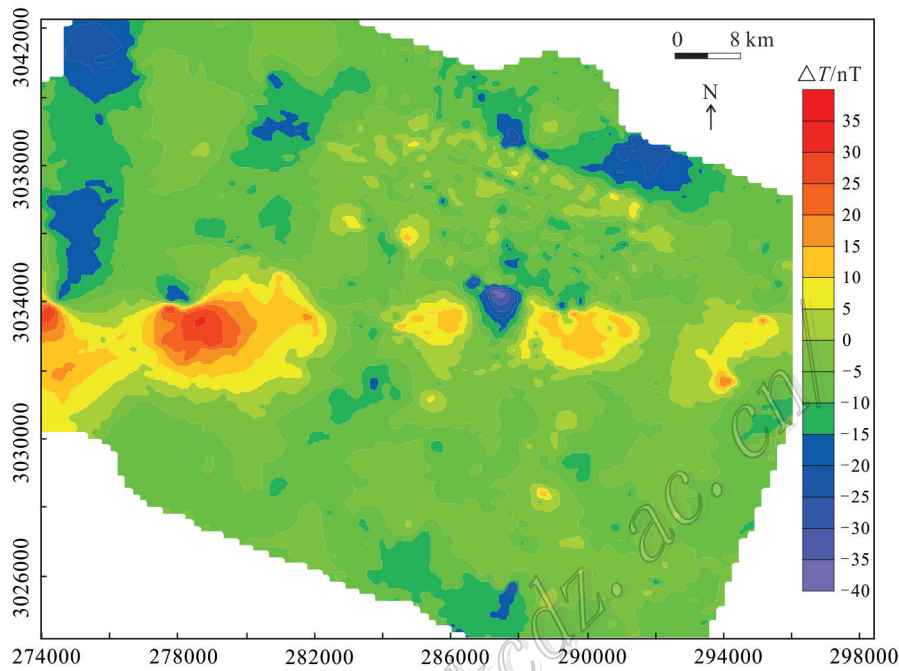


图2 岑巩页岩气区块化极前 ΔT 异常图
Fig. 2 Magnetic anomaly ΔT before reduction-to-pole in Cen'gong block

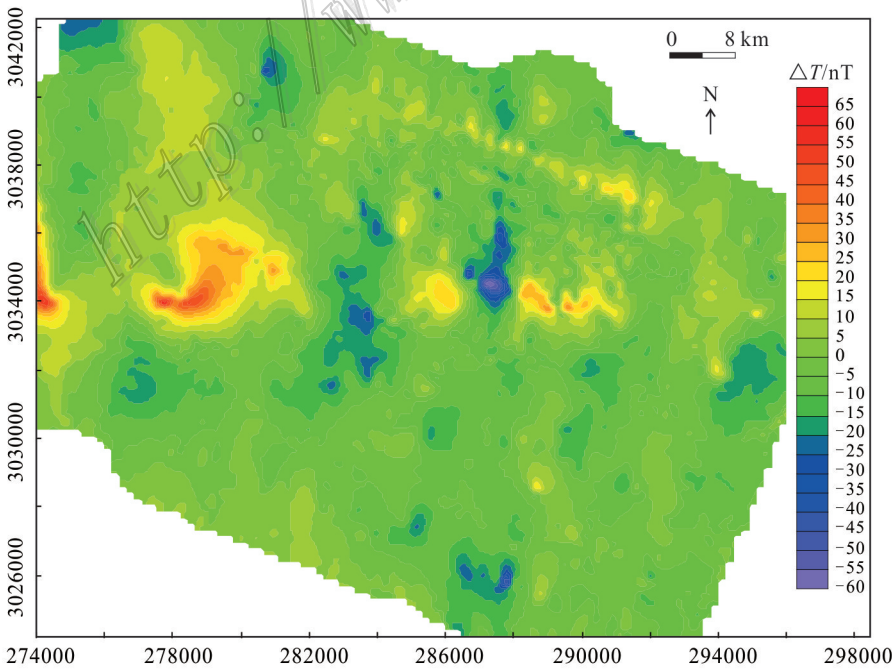


图3 岑巩页岩气区块化极后 ΔT 异常图
Fig. 3 Magnetic anomaly ΔT after reduction-to-pole in Cen'gong block

择的磁化倾角、磁化偏角分别是 42.3° 和 -2.55° ,结果如图3所示。磁力数据通过RGIS 2014软件的化极处理后(图2、图3),发现化极后的磁异常向北有较小的偏离,这可能与测区较小的磁倾角有关。另外,化极后磁异常数据的离散性变大,从化极前的 $-45\sim 34$ nT变化到化极后的 $-65\sim 60$ nT,这说明下方磁异常体位置埋深较浅。

2.3 磁异常圈定

通过研究区野外高精度磁测资料室内整理、分析和解释,圈定研究区高精度磁测异常。根据地面高精度磁测技术规程,一般认为,大于2.5~3倍磁测总均方误差的异常是可靠的。高精度磁测的均方误差为3.19 nT,因此本测区的磁异常下限为10 nT,磁异常等值线可按照0 nT、 ± 10 nT、 ± 20 nT、 ± 30 nT.....来勾绘(图4)。此次研究区一共圈出10个物探高精度磁测异常,其中包括4个磁正异常和6个磁负异常,正异常沿东西向成串珠状展布,负异常分布在正异常两侧(图4)。

研究区已钻探的5口井有4口井(天星1井、岑页1井、岑地1井、岑地4井)位于磁负异常区,一口井(天马1井)位于磁正异常区,天星1井、岑页1井、岑地1井、岑地4井均有不同程度的气流,尤其天星1井出气良好,而天马1井为干井,表明研究区磁负异

常与中寒武系牛蹄塘组页岩气有很好空间匹配关系。前人认为,油气区磁异常与成岩作用生成的次生矿物有密切的关系,烃渗漏在含油气层上方生成的磁性黄铁矿是引起磁异常的关键因素(Fishman et al., 1989; 刘青松等, 1996; 刘庆生, 1991)。本研究认为,引起地面磁正负异常与基底起伏形态以及断裂构造分布密切相关。

3 研究区磁性基底埋深沉

3.3 切线法反演原理

切线法是利用异常曲线上特征点处切线坐标间的关系来获取地下磁性体产状要素的一种方法。由于此方法受正常场选择的影响较小,在 ΔT 异常定量解释中得到广泛的应用(管志宁, 2005)。

本文利用斜磁化二度体的 ΔT 切线法对岑巩页岩气区块磁测剖面异常场进行了反演。其基本原理如下:

根据二度板状体规格化公式可知:

$$\Delta T = \frac{\sin I}{\sin i_s} (Z_a'' \cos \theta + H_a'' \sin \theta)$$

为了讨论简单方便,可以对系数 $\frac{\sin I}{\sin i_s}$ 不加考虑,

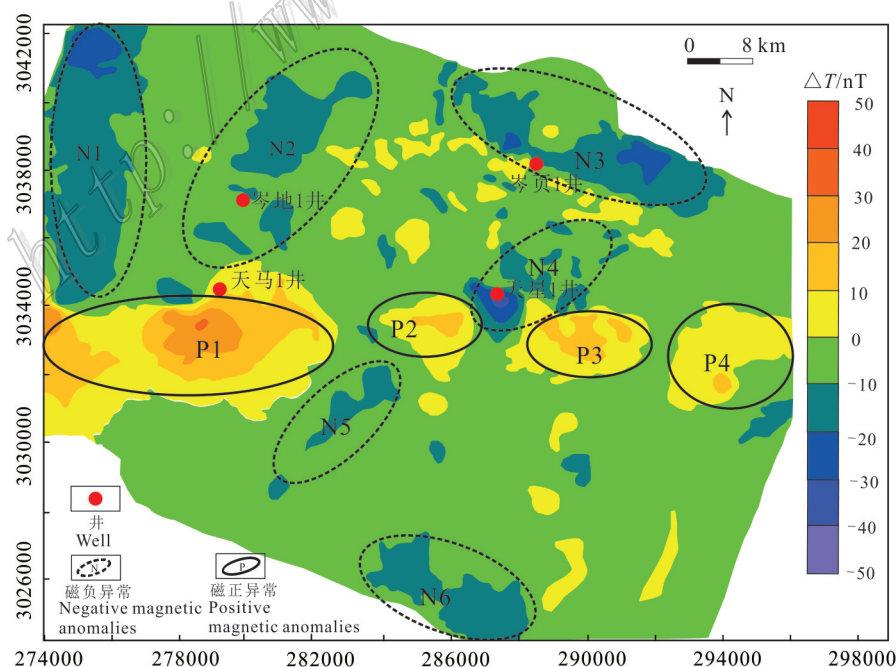


图4 岑巩页岩气区高精度磁测圈定异常

Fig. 4 Positive anomalies and negative anomalies in Cen'gong block

因为此项系数并不会改变异常曲线的形态特征,只会影响其强度,在计算磁化强度时应该加以考虑。上式可简写为

$$\Delta T = Z_a'' \cos \theta + H_a'' \sin \theta$$

分别求出对 x 的一次、二次导数:

$$\Delta T_x = f_x \cos \theta + \varphi_x \sin \theta, \Delta T_{xx} = f_{xx} \cos \theta + \varphi_{xx} \sin \theta$$

式中, f_x 、 f_{xx} 及 φ_x 、 φ_{xx} 分别为 Z_a'' 和 H_a'' 的一阶、二阶水平偏导数。若令 $\Delta T_x = 0$, 则可得 ΔT 曲线极值点的横坐标 $x_{\max}$ 以及 $x_{\min}$; 若令 $\Delta T_{xx} = 0$, 又可得其拐点的横坐标 x_{G4} 及 x_{G1} 。进而还可得出极值 $\Delta T_{\max}$ 、 $\Delta T_{\min}$ 及拐点处的场值 ΔT_{G4} 、 ΔT_{G1} , 过拐点处切线 L_1 、 L_2 的斜率 $(\Delta T)_{G4m}$ 、 $(\Delta T)_{G1m}$ 以及特征曲线段 x_0 、 x_{04} 、 x_{m1} 和 x_{m4} 等 14 个基本参数 (图 5)。

为了求得磁性体的埋藏深度、磁化强度以及宽度, 可以对图 5 中的 14 个参数进行多种形式的组合。这些组合遵循严格的数学关系式, 通过计算可编出不同角参数 θ 来求得磁性体埋藏深度、磁化强度以及宽度时的系数表, 以便进行切线法反演的计算 (图 6)。

拐点法计算步骤如下:

- (1) 由实测 ΔT 曲线上取 $\frac{x_{G4} - x_{\max}}{x_{G1} - x_{\max}}$ 的比值。
- (2) 根据此比值查列线图 6, 确定系数 K_h 、 K_b 和 K_m 的值。
- (3) 按下式求得 h 、 b 和 M 。

$$h = \frac{x_{G4} - x_{G1}}{K_h}, b = \frac{x_{G4} - x_{G1}}{K_b}, M = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_G}{K_m} \quad (1)$$

由上述公式 (1) 可知, 此方法与正常场的选择无关, 另外也不需要确定原点, 只要求两拐点附近的曲线未受干扰即可。当角参量 θ 小于或等于 60° 时, 解释效果较理想。

3.2 磁性基底埋深

磁法勘探研究磁异常, 磁异常主要由磁性岩石在地球磁场磁化作用下产生, 其中岩石磁性是内因, 地球磁化场是外因 (管志宁, 2005)。如表 2 所示, 研究区震旦系、寒武系、奥陶系以及第四系沉积岩磁性非常弱, 磁化率在 $0 \sim 25 \times 4\pi \times 10^{-6}$ SI 之间。新元古界 (板溪群) 的岩性以各种浅变质岩为主, 磁性很小, 磁化率一般小于 $25 \times 4\pi \times 10^{-6}$ SI。中元古界 (梵净山群、四堡群) 组成岩性主要为变余凝灰岩、辉绿岩以及辉长岩, 磁性变化范围较大, 介于 $12 \sim 1462 \times 4\pi \times 10^{-6}$ SI 之间, 平均值为 $76 \times 4\pi \times 10^{-6}$ SI, 另外, 该层与上覆岩层呈不整合面接触 (范祥发, 2003)。因此, 此次岑巩页岩气区磁测工作, 磁性界面一般认为是与中元古界顶界相当的变质岩磁性界面。

利用斜磁化二度体 ΔT 切线法, 可计算不同测线上特征点对应处磁性界面顶埋深, 图 7 为利用该方法解释测线 SN500 特征点对应磁性界面顶埋深, 表 1 为测线 SN500 特征点参数, 计算的磁性界面埋深为 2695 m。图 8 为不同测线特征点对应处磁性体

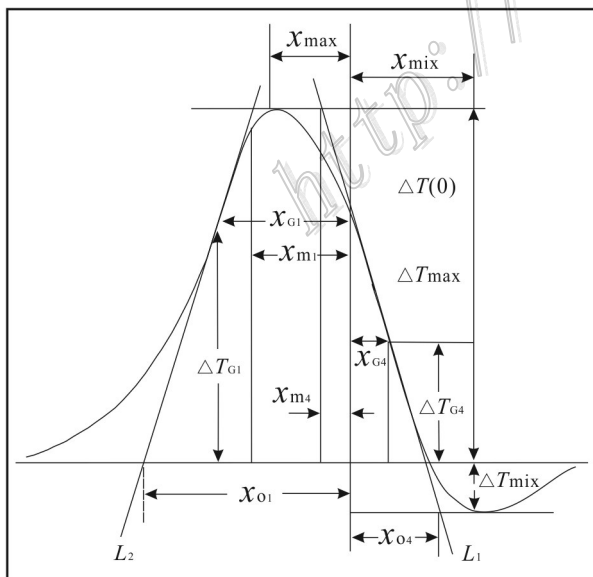


图 5 ΔT 切线法特征线段
Fig. 5 Characteristic line segment using of ΔT tangent method

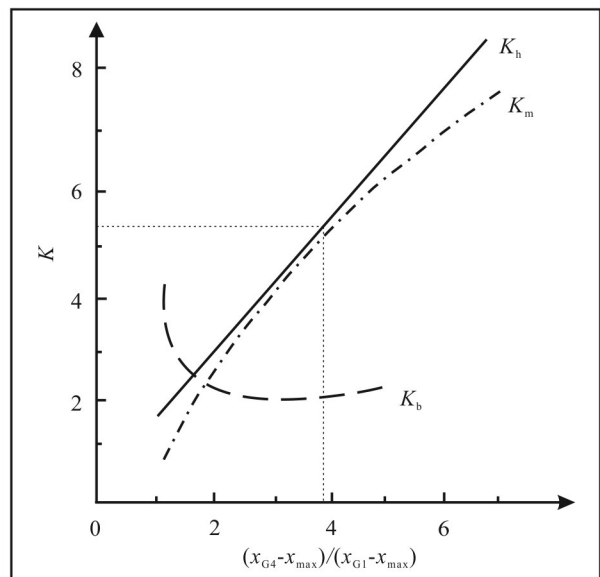


图 6 斜磁化拐点法参量列线图
Fig. 6 Parameters using oblique magnetization inflexion method

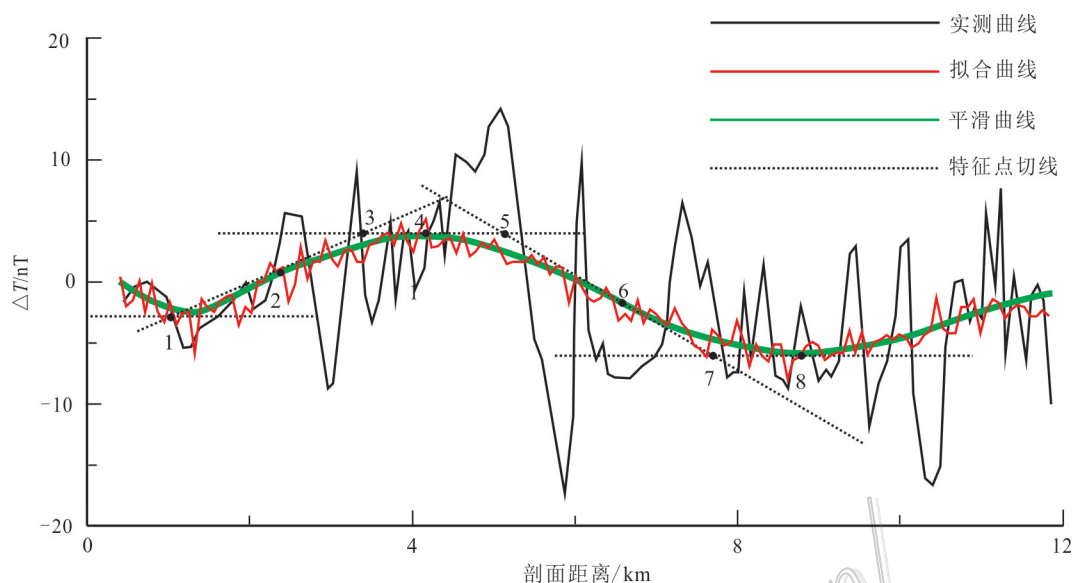
图7 利用斜磁化二度体 ΔT 切线法解释测线SN500Fig. 7 Interpretation on line SN500 by oblique magnetized two-dimensional body ΔT tangents method

表1 岑巩页岩气区磁法测线SN500特征点参数

Table 1 Parameters of feature point on maganetic survey line SN500 in Cen'gong block								
项目	1	2	3	4	5	6	7	8
横坐标	1.01	2.32	3.41	4.16	5.14	6.59	7.73	8.82
斜率	0	2.82	-9999	0	-9999	-3.91	-9999	0

表2 岑巩页岩气区岩石磁性统计

Table 2 Magnetic statistics of rocks in Cen 'gong block							
地层	代号	岩性	磁化率(k)/ $4\pi\times 10^{-6}$ SI		剩磁(Mr)/ 10^{-3} A/m		
			变化范围	均值	变化范围	均值	
盖层	第四系	Q	黏土	0~5	1	-	<3
	奥陶系	O	泥灰岩、灰岩、砂岩、白云岩	1~25	3~5	1~38	<3
	寒武系	Є	白云岩、灰岩、砂岩、页岩	0~25	1~6	0~87	<3
	新元古界	Pt ₃ -Z	硅质页岩、白云岩	0~25	1~6	0~87	<3
	新元古界	Pt ₃ -Nh	页岩、碳酸盐岩	0~25	1~6	0~87	<3
基底	中元古界	Pt ₂	变余凝灰岩、辉绿岩、辉长岩	12~1462	76	1~1000	12

顶界埋深图,由图8可以看出,研究区西南部天马1井附近磁性体基底埋深在2000~2200 m,中部天星1井及其周缘地带磁性基底埋藏最深,为约3900 m,东部磁性基底埋深在2600~3500 m。

基于研究区1:5万的高精度磁法数据,选取优化滤波、正则化滤波以及补偿圆滑滤波等方法提取基底剩余磁异常,根据磁测剖面反演结果、钻井数据以及测区岩石物性数据,选取各种反演参数,经反演计算可得到贵州岑巩页岩气区磁性基底的埋藏深度以及基底起伏形态特征(图9)。研究区中部是主要

凹陷区,有利于沉积物堆积、快速埋藏以及成岩,从构造背景上来看,这无疑对盆地寒武纪牛蹄塘组黑色油页岩烃的生成和排出是有利的。

4 结 论

(1) 通过对贵州岑巩页岩气区块高精度磁法勘探工作野外数据的整理、处理以及分析,一共获得10个高精度磁测异常区,其中,N1、N2、N3、N4、N5、N6为磁负异常区,P1、P2、P3、P4为磁正异常区。研究

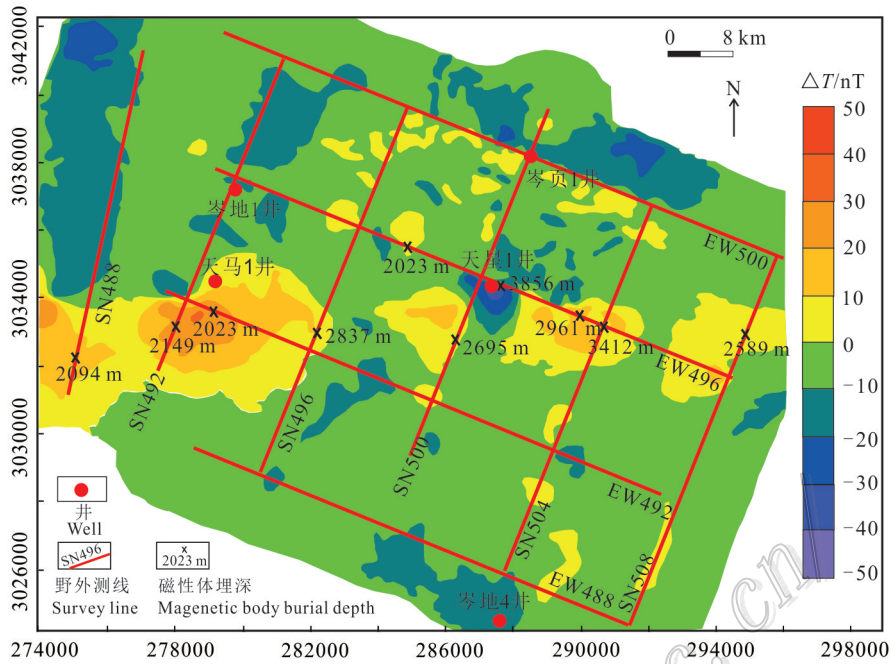


图8 岑巩页岩气区切线法解释的磁异常顶部埋深

Fig. 8 Interpretation of the top buried depth of magnetic anomalies by tangent method in Cen'gong block

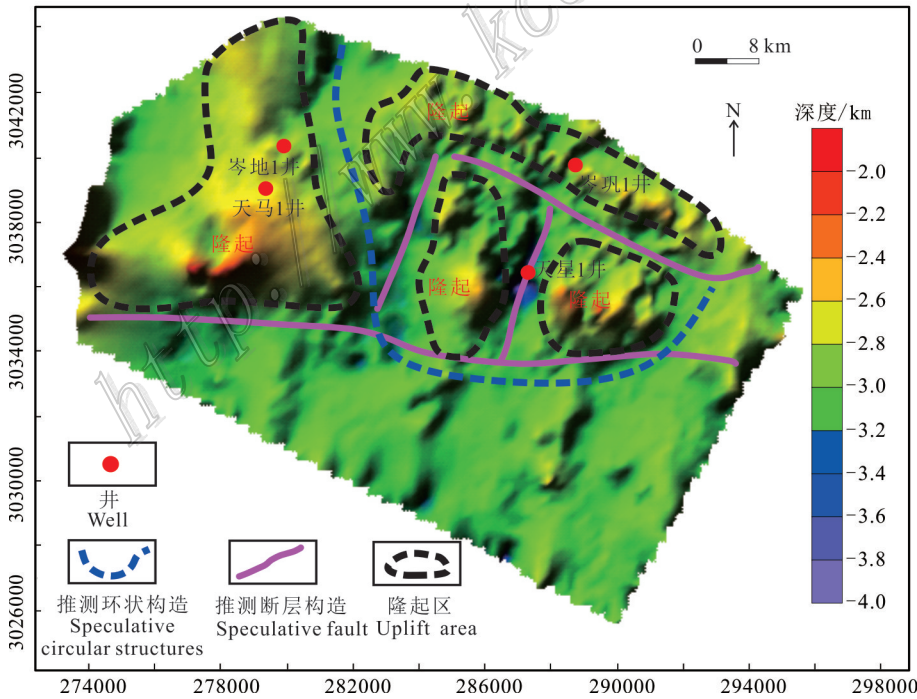


图9 岑巩页岩气区基底埋深及断裂解释

Fig. 9 Interpretation of basement burial depth and fracture distribution in Cen'gong block

区磁负异常区与已钻遇气井具有很好空间匹配关系。

(2) 研究区已钻探的5口井有4口井(天星1井、岑页1井、岑地1井、岑地4井)位于磁负异常区,一

口井(天马1井)位于磁正异常区,天星1井、岑页1井、岑地1井、岑地4井均有不同程度的气流,尤其天星1井出气良好,而天马1井为油气空井,表明在测区投入高精度磁测来寻找页岩气是有效的。

(3) 利用斜磁化二度体的 ΔT 切线法对磁性体埋深进行反演计算,得到了磁性体的顶端埋藏深度,计算结果与研究区电法计算结果一致,表明 ΔT 切线法反演计算磁性体埋深具有很好精度。

(4) 本文获得的磁性基底为与中元古界顶界相当的变质岩磁性界面,深度2~4 km,反映了盆地内变质结晶基底的构造形态和起伏特征。磁性基底凹陷上发育的构造低部位为盆地页岩气的形成、聚集提供了条件,是有利勘探区块。

References

- Cheng K M, Wang S Q, Dong D Z, Huang J L and Li X J. 2009. Accumulation conditions of shale gas reservoirs in the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation, the Upper Yangtze region[J]. *Nature Gas Industry*, 29(5): 40-44(in Chinese with English abstract).
- Fishman N S. 1989. Source of anomalous magnetization in area of hydrocarbon potential: Petrologic evidence from Turrassic Pruss Sandstone, Wyoming-Idaho Thrust belt[J]. *AAPG Bulletin*, 10(73):182-194.
- Fan X F. 2003. A summary on physical property parameters in southeastern Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 2(20): 2-10(in Chinese with English abstract).
- Gao J T, An Z C, Gu Z W, Han W, Zhan Z J and Yao T Q. 2005. Selections of the geomagnetic normal field and calculations of the geomagnetic anomalous field[J]. *Progress in Geophysics*, 48(1): 56-62 (in Chinese with English abstract).
- Guan Z N. 2005. *Geomagnetic field and magnetic exploration*[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-309(in Chinese).
- Leng J G, Han J H, Li F, Li P and Meng L. 2014. Exploration potential of shale gas in Huayuan Block, northwest Hunan Province[J]. *Natural Gas Geoscience*, 25(4): 624-631(in Chinese with English abstract).
- Li X J, Hu S Y and Cheng K M. 2007. Suggestions from the development of fractured shale gas in North American[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 34(4): 392-400(in Chinese with English abstract).
- Liu Q S and Wang B R. 1996. Today and future of hydrocarbon reservoir exploration using micromagnetization[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 31(3): 454-463(in Chinese with English abstract).
- Liu K and Hao T Y. 2014. Application of potential field method in the unconventional oil and gas exploration[J]. *Progress in Geophysics*, 29(2): 786-797(in Chinese with English abstract).
- Liu Q S. 1991. Study of oil and gas exploration with magnetic method[J]. *Geological Science and Technology Information*, 10(4): 89-94 (in Chinese with English abstract).
- Liang C, Jiang Z X, Guo L and Yang Y T. 2012. Sedimentary characteristics and shale gas significance of Lower Cambrian black shale in Qianbei Area[J]. *Fault Block Oil and Gas Field*, 19(1): 22-26(in Chinese with English abstract).
- Nie H K, Tang X and Bian R K. 2009. Controlling factors for shale gas accumulation and prediction of potential development area in shale gas reservoir of South China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 30(4): 484-491(in Chinese with English abstract).
- Nie Y S, Leng J G, Han J H, Sun L and Shen G C. 2013. Exploration potential of shale gas in Cen'gong Block, southeastern Guizhou Province[J]. *Oil and Gas Geology*, 34(2): 274-280(in Chinese with English abstract).
- Sun W. 2012. The study on the application of electrical prospecting of oil in Ordos Basin[D]. (Master's thesis) Supervisor: Sun W. Xi'an: Chang'an University. 67(in Chinese).
- Sims W E, Bostick F X and Smith H W. 1971. The estimation of magnetotelluric impedance tensor elements from measured data[J]. *Geophysics*, 36: 538-542.
- Ward S H. 1980. Electrical, electromagnetic and magnetotelluric methods[J]. *Geophysics*, 45:1659-1666.
- Wang R Y, Ding W L, Gong D J, Zen W T, Wang X H, Zhou X H, Li A and Xiao Z K. 2016. Development characteristics and major controlling factors of shale fractures in the Lower Cambrian Niutitang Formation, southeastern Chongqing-northern Guizhou area[J]. *Acta Petrology Sinica*, 37(7): 832-845(in Chinese with English abstract).
- Wang R Y, Ding W L, Zhang Y Q, Wang Z, Wang X H, He J H, Zeng W T and Dai P. 2016. Analysis of developmental characteristics and dominant factors of fractures in Lower Cambrian marine shale reservoirs: A case study of Niutitang Formation in Cen'gong Block, southern China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 138: 31-49.
- Wang J I, Zhang L X and Jin G Y. 1982. A search of magnetic exploration[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 32(6): 60-65.
- Yang W C, Wang J L, Zhong H Z and Chen B. 2012. Analysis of regional magnetic field and source structure in Tarim Basin[J]. *Progress in Geophysics*, 55(4): 1278-1287(in Chinese with English abstract).
- Zhang G. 2011. The method research of identification and extraction of oil gravity and magnetic anomalies (Master's thesis)[D]. Supervisor: Liu Z. Beijing: China University of Petroleum. 118(in Chinese).
- Zhang J J. 2010. The research of tectonic evolution in Southern Guizhou Depression (Master's thesis)[D]. Supervisor: Wang W F. Beijing: China University of Petroleum. 112(in Chinese).
- Zhang J C, Jin Z J and Yuang M S. 2004. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution[J]. *Natural Gas Industry*, 24(7): 15-18

(in Chinese with English abstract).

- Zhao B M, Hao T Y and Xu Y. 2009. Transformation and processing of magnetic anomalies in the area of low magnetic latitudes[J]. Progress in Geophysics, 24(1): 124-130(in Chinese with English abstract).
- Zou C N, Dong D Z, Wang S J, Li J Z, Li X J, Wang Y M, Li D H and Chen K M. 2010. Geological characteristic formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 37(6): 641-653(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 程克明, 王世谦, 董大忠, 黄金亮, 李新景. 2009. 上扬子区下寒武统筇竹寺组页岩气成藏条件[J]. 天然气工业, 29(5): 40-44.
- 范祥发. 2003. 贵州东南部岩(矿)石物性参数[J]. 贵州地质, 2(20): 2-10.
- 高金田, 安振昌, 顾左文, 韩伟, 詹志佳, 姚同起. 2005. 地磁正常场的选取与地磁异常场的计算[J]. 地球物理学报, 48(1): 56-62.
- 管志宁. 2005. 地磁场与磁力勘探[M]. 北京: 地质出版社. 1-309.
- 冷济高, 韩建辉, 李飞, 李鹏, 孟兰. 2014. 湘西北地区花垣页岩气区块勘探潜力[J]. 天然气地球科学, 25(4): 624-631.
- 李新景, 胡素云, 程克明. 2007. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示[J]. 石油勘探与开发, 34(4): 392-400.
- 梁超, 姜在兴, 郭岭, 杨懿婷. 2012. 黔北地区下寒武统黑色页岩沉积特征及页岩气意义[J]. 断块油气田, 19(1): 22-26.
- 刘康, 郝天珧. 2014. 位场方法在非常规油气勘探中的应用[J]. 地球物理学进展, 29(2): 786-797.
- 刘青松, 王宝仁. 1996. 应用微磁寻找油气藏的研究现状与展望[J]. 石油地球物理勘探, 31(3): 454-463.
- 刘庆生. 1991. 磁法直接找油研究的现状和进展[J]. 地质科技情报, 10(4): 89-94.
- 聂海宽, 唐玄, 边瑞康. 2009. 页岩气成藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测[J]. 石油学报, 30(4): 484-491.
- 聂永生, 冷济高, 韩建辉, 孙利, 沈贵春. 2013. 黔东南地区岑巩页岩气区块勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 34(2): 274-280.
- 孙伟. 2012. 电法勘探在鄂尔多斯盆地油气勘探中的应用研究[D]. (硕士论文)导师:孙伟. 西安: 长安大学. 67.
- 王家林, 张林祥, 金国英. 1982. 磁测找油的探索[J]. 石油地球物理勘探, 32(6): 60-65.
- 王濡岳, 丁文龙, 龚大建, 曾维特, 王兴华, 周学慧, 李昂, 肖子亢. 2016. 渝东南—黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩裂缝发育特征与主控因素分析[J]. 石油学报, 37(7): 832-845.
- 杨文采, 王家林, 钟慧智, 陈冰. 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.
- 张刚. 2011. 油气重磁异常识别及提取方法研究(硕士论文)[D]. 导师: 刘展. 北京: 中国石油大学. 118.
- 张江江. 2010. 黔南坳陷构造演化研究(硕士论文)[D]. 导师: 王伟锋. 北京: 中国石油大学. 112.
- 张金川, 金之钧, 袁明生. 2004. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业, 24(7): 15-18.
- 赵百民, 郝天珧, 徐亚. 2009. 低纬度磁异常的转换与处理[J]. 地球物理学报, 24(2): 124-130.
- 邹才能, 董大忠, 王社教, 李建忠, 李新景, 王玉满, 李登华, 程克明. 2010. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 37(6): 641-653.