

重力数据处理中几种断裂构造识别方法的组合应用

郇恒飞¹, 郭灿文², 孙守亮¹, 李永飞¹, 高 铁¹, 王 洋³

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 2. 国家海洋信息中心, 天津 300171;
3. 大庆钻探地质录井二公司, 吉林 松原 138000

摘 要: 为了提高使用重力数据推断断裂构造的有效性, 先以“田”字形小子域滤波法突出重力梯级带异常, 再分别联合水平总梯度模、解析信号振幅及水平方向导数进行二次处理。通过理论模型试验, 比较单方法及不同组合方法的处理效果, 并将组合方法应用到金羊盆地实测重力数据的处理中, 推断研究区的断裂构造格架。与地震剖面划分的断裂进行对比, 证明了利用组合方法划分断裂构造的有效性。研究表明, 已有断裂构造识别方法的组合应用能够更清晰地刻画地质体的边界, 在应用重力数据推断断裂构造方面具有非常好的实用性。

关键词: 重力数据; 断裂构造; “田”字形小子域滤波; 水平总梯度模;
解析信号振幅; 水平方向导数

开放科学标志码(OSID):



DOI: 10.13686/j.cnki.dzyz.2020.05.009

COMBINED APPLICATION OF SEVERAL METHODS FOR FAULT STRUCTURE IDENTIFICATION IN GRAVITY DATA PROCESSING

HUAN Heng-fei¹, GUO Can-Wen², SUN Shou-liang¹, LI Yong-fei¹, GAO Tie¹, WANG Yang³

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China; 2. National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China;
3. No.2 Geological Logging Plant of Daqing Drilling and Exploration Co., Ltd., Songyuan 110031, Jilin Province, China

Abstract: To improve the effect of gravity data to infer fault structures, the gridding small domain filtering method is used to highlight the anomaly of gravity gradient zone first, then the horizontal total gradient modulus, analytic signal amplitude and horizontal direction derivative are combined respectively to carry out the secondary processing. Through theoretical model tests, the processing result of single method is compared with that of different combination methods. The combination methods are applied in the measured gravity data processing of Jinyang Basin to infer the fault structure framework in the study area. Comparison of the faults with those determined by seismic section proves the effectiveness of the combined methods in division of fault structures. The results show that the combined application of existing fault structure identification methods can clearly delineate the boundary of geological bodies, and is particularly practical in gravity data processing.

Key words: gravity data; fault; gridding small subdomain filtering; horizontal total gradient modulus; analytical signal amplitude; horizontal direction derivative

收稿日期: 2020-03-16; 修回日期: 2020-05-10. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局项目“松辽外围南部盆地群油气基础地质调查”(DD20160167), “冀北-辽西中新元古界油气地质调查”(DD201900098), “大连海岸带陆海统筹综合地质调查”(DD20189504); 国家重点研发计划项目“华北克拉通成矿系统的深部过程与成矿机理”(2016YFC0600108).

作者简介: 郇恒飞(1988—), 男, 硕士, 工程师, 现从事地球物理资料处理与解释综合研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//huanhengfei@126.com

0 引言

作为地球物理勘探中的一种重要方法,重力法推断断裂特征是研究地质构造的重要手段^[1-2]。如何利用重力数据准确高效地提取断裂构造,一直是国内外学者研究的热点。杨高印^[3]为提高断裂构造信息的分辨力,提出了小子域滤波法,通过强化重力梯级带来确定断裂构造的位置。国内许多学者^[4-8]都对小子域滤波方法进行了不同程度的改进,使小子域滤波输出的结果更优。许海红等^[9]系统总结了不同类型的小子域滤波法,认为“田”字形小子域滤波法具有较好的滤波效果。重力异常在断裂构造处具有较大的变化率,所以如今确定断裂构造的方法几乎都以导数计算为基础^[10]。其中,水平总梯度模^[11]、解析信号振幅^[12]都利用极大值信息来确定断裂构造的位置;水平方向导数^[13]能将重力异常的梯级带转换为极值(极大或极小),突出对应方向的断裂构造。但这3种常用断裂构造识别方法对噪声的压制能力差,且横向分辨率低。崔瑞华等^[14]首先将小子域滤波结合水平梯度矢量模组合处理技术应用于滨北地区的断裂划分,此项技术可作为划分断裂的有效手段。许海红等^[15]采用改进的小子域滤波与总水平导数联合方法,可以较好地识别场源体界线。本文在前人工作的基础上,采用“田”字形小子域滤波法预处理来强化重力梯级带,然后分别采用水平总梯度模、解析信号振幅及水平方向导数进行二次处理,多方法组合以增强断裂识别结果的精度,将其应用于金羊盆地1:5万高精度重力数据处理中,试图合理、准确地识别出研究区的断裂构造特征。

1 研究区地质概况

金岭寺-羊山盆地(即金羊盆地),位于华北地台燕山台褶带东北缘的中段,西侧以南天门断裂带为界,与北票盆地、朝阳盆地和建昌盆地相邻^[16],是辽西地区最大的中生代陆相断陷盆地(图1)。金羊盆地沿北东向长约200 km,宽约39 km,面积7430 km²,是中国北方侏罗系发育最完备地区之一^[17]。该盆地蕴含多种矿产资源,是煤、油、气矿产勘探的重要区域,近几年取得不少油气新发现^[18-20]。

中三叠世末以来,由于受印支、燕山运动的影响,辽西地区发生了强烈的构造岩浆活化作用,区域内早期的北东向构造为本区的主体构造,主要构造形迹为

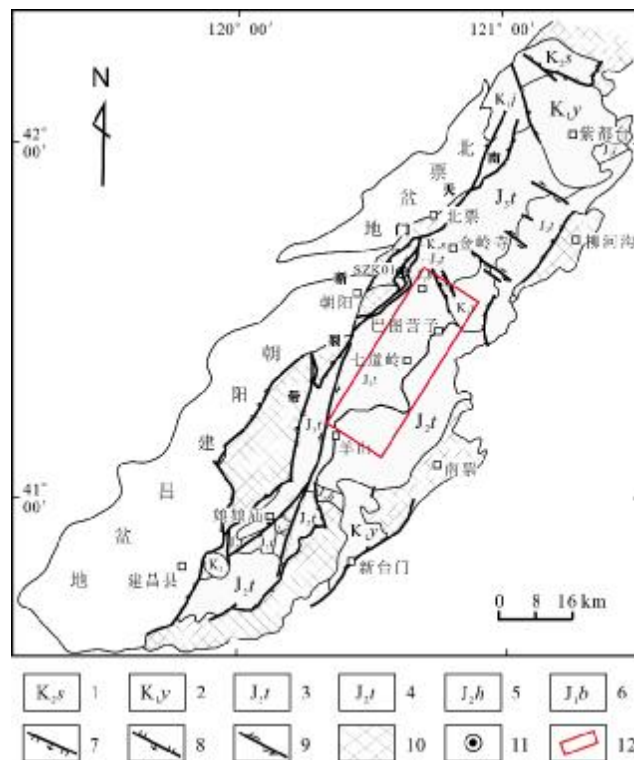


图1 金羊盆地及邻区地质概图

(据文献[18]修改)

Fig. 1 Geological sketch map of Jinyang Basin and adjacent areas

(Modified from Reference [18])

1—孙家湾组(Sunjiawan fm.); 2—义县组(Yixian fm.); 3—土城子组(Tuchengzi fm.); 4—髫髻山组(Tiaojishan fm.); 5—海房沟组(Haifanggou fm.); 6—北票组(Beipiao fm.); 7—正断层(normal fault); 8—逆断层(reverse fault); 9—走滑断层(strike-slip fault); 10—前中生界隆起区(pre-Mesozoic uplift); 11—井位(well location); 12—重力测量区(gravity survey area)

区域性的褶皱构造、逆冲推覆构造。这些构造不仅控制了众多火山机构的分布,还控制着中生代盆地以及这些盆地内陆相火山-沉积岩系的空间展布,从而形成了由太古宇—古生界组成的基底隆起和中新生代盆地相间的构造格局。晚期北西向构造也较发育,主要构造形迹为较大的平移断层和正断层,并对下白垩统义县组的火山-沉积岩系有一定控制作用。此外,还有一些近东西向、北东东向断裂及韧性剪切带。

2 断裂识别方法及模型试验

2.1 断裂识别方法组合应用原理

肖锋等^[6]在传统小子域滤波法的基础上,对小子域的剖分方式进行改进,将剖分方式完全按照横、竖划

分,即“田”字形剖分(图2),计算8个子域内异常的均方差,以最小均方差的子域内异常平均值作为中心点区域场的输出结果。“田”字形小子域滤波计算效率高,异常分区的界线更清晰,异常边界拐点形态失真小。

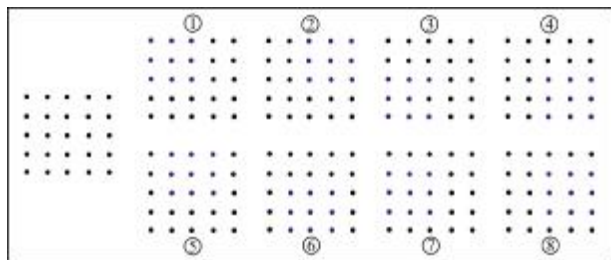


图2 “田”字形小子域滤波法的子域划分方法

Fig. 2 Subdomain division in the method of gridding small subdomain filtering

该方法在各子域内数据的均方差计算公式为:

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - \bar{f})^2} \quad n=0, 1, \dots, 8 \quad (1)$$

式中, N 为子域内数据的个数; f 为子域内异常值; $\bar{f}$ 为子域的异常平均值; σ_n 为各子域内数据的均方差, 将 σ_n 最小的子域的异常均值作为输出结果。

水平总梯度模法^[11]和解析信号振幅法^[12]都是利用极大值位置来确定地质体的边缘位置, 前者精度比垂向导数法高, 后者对数据的分辨能力低, 限制了其应用。

水平总梯度模法的计算公式如下:

$$THDR = \sqrt{(\partial f / \partial x)^2 + (\partial f / \partial y)^2} \quad (2)$$

式中, f 为位场函数。

解析信号振幅法的计算公式如下:

$$ASM = \sqrt{THDR + VDR} \quad (3)$$

$$VDR = \sqrt{(\partial f / \partial z)^2} \quad (4)$$

式中, $THDR$ 和 VDR 分别表示位场异常的总水平导数和垂直导数。

水平方向导数^[13]可以用来突出某一方向的异常特征, 而不同求导方向突出的是与其垂直方向的异常特征, 利用其等值线圈闭的同向轴可以指示密度变化的边界, 从而可利用其判断断裂的平面位置。

水平方向导数法的计算公式如下:

$$HDD = \frac{\partial f}{\partial s} = \cos\theta \frac{\partial f}{\partial x} + \sin\theta \frac{\partial f}{\partial y} \quad (5)$$

式中, f 为位场函数, s 为实测平面上某一任意方向, θ 为 s 与 x 方向的夹角。

本文的处理方法是基于小子域滤波和3种常用断裂推断方法的优缺点, 充分发挥小子域滤波法对噪声的压制能力及较高的分辨力和3种断裂识别方法可以比较处理结果精度的优点。先采用“田”字形小子域滤波法对位场数据进行处理, 此过程需要选择合适的滤波窗口(一般采用5点×5点)及滤波次数(一般不超过3次), 以此突出异常变化的分界特征, 即异常梯级带的平面位置; 然后分别采用上述3种断裂识别方法进行二次处理, 从而将滤波后的异常梯级带转换为极值信息, 这样就可获得更清晰、更直观的断裂构造信息。

2.2 模型试验

为了检验断裂构造识别方法在重力数据处理中组合应用的效果, 设计如表1所示参数的长方体地质模型M和N。模型N是在模型M的基础上, 加大异常体的埋深变化, 比较组合方法的处理效果。

表1 理论模型参数

Table 1 Parameters of theoretical models

模型	异常体编号	长度/m	宽度/m	高度/m	深度/m	密度差/g·cm ⁻³
M	1	4000	2000	500	200	0.8
	2	6000	3000	800	300	0.8
	3	8000	4000	1000	500	0.8
N	1	4000	2000	500	200	0.8
	2	6000	3000	1000	1500	0.8
	3	8000	4000	2000	3000	0.8

2.2.1 模型M试验结果

依据模型M的参数, 正演获得地质体模型产生的重力异常(图3a)(单位为mGal)。分别使用“田”字型小子域滤波法(滤波窗口为5点×5点, 滤波2次)、水平总梯度模法、“田”字形小子域滤波与水平总梯度模组合法、解析信号振幅法、“田”字形小子域滤波与解析信号振幅组合法、(0°、45°、90°、135°)水平方向导数法、“田”字形小子域滤波与(0°、45°、90°、135°)水平方向导数组合法进行处理, 处理结果如图3b~n所示。

从处理结果图可知, “田”字形小子域滤波具有较好的滤波效果, 增强了重力梯级带的信息, 但等值线会有一定的干扰, 难以比较边缘识别结果的精度(图3b); 水平总梯度模处理的结果能较连续地显示地质体

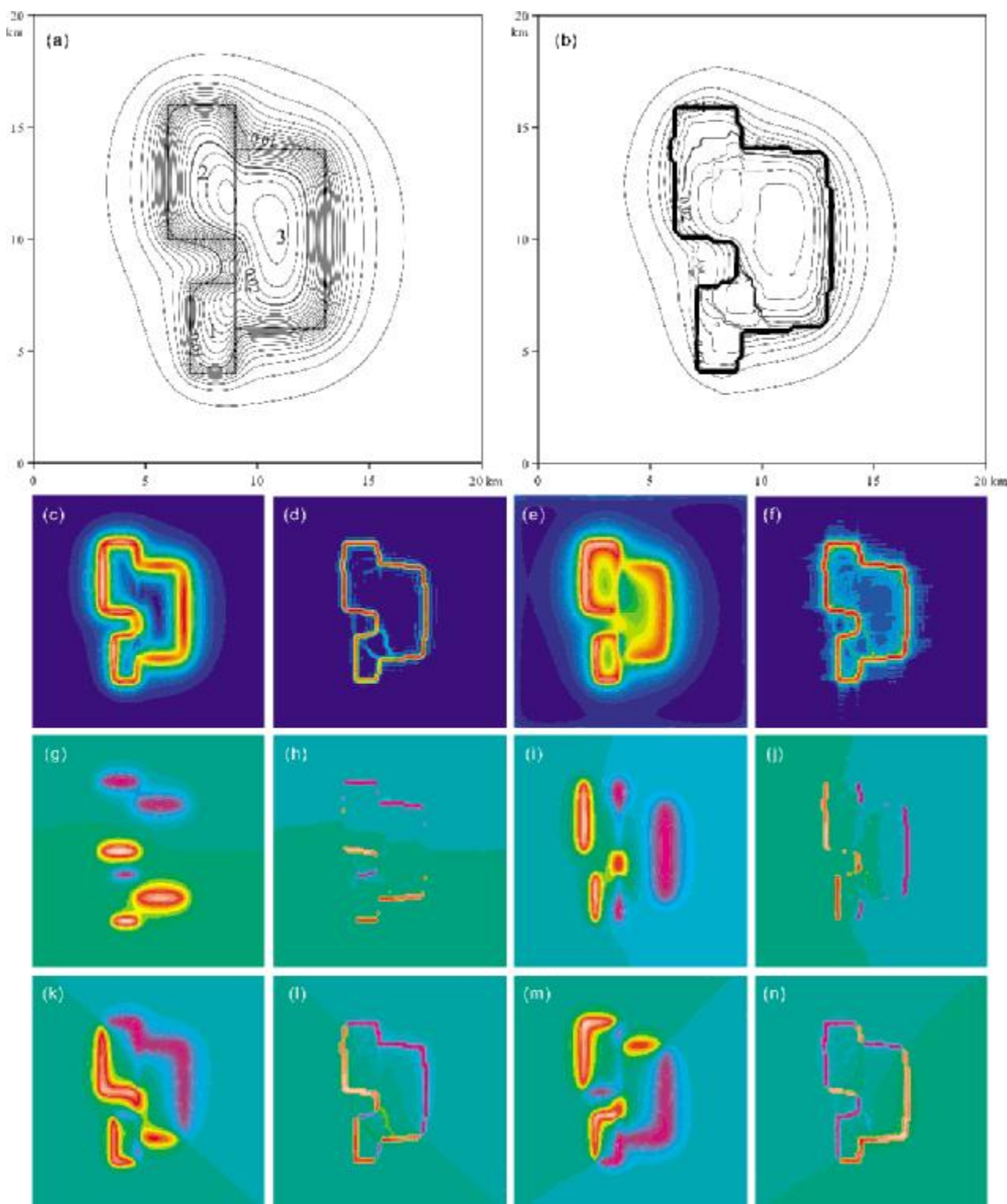


图3 模型 M 重力异常及不同方法组合处理结果

Fig. 3 Gravity anomaly of model M and processing results for combination of different methods

a—模型及重力异常平面等值线图(model and gravity anomaly contour map); b—“田”字形小子域滤波法的处理结果(processing result of gridding small subdomain filtering); c—水平总梯度模法的处理结果(processing result of horizontal total gradient modulus); d—“田”字形小子域滤波与水平总梯度模组合(combination of gridding small subdomain filtering and horizontal total gradient modulus); e—解析信号振幅法的处理结果(processing result of analytical signal amplitude); f—“田”字形小子域滤波与解析信号振幅组合(combination of gridding small subdomain filtering and analytical signal amplitude); g— 0° 水平方向导数法的处理结果(processing result of 0° horizontal direction derivative); h—“田”字形小子域滤波与 0° 水平方向导数组合(combination of gridding small subdomain filtering and 0° horizontal direction derivative); i— 90° 水平方向导数法的处理结果(processing result of 90° horizontal direction derivative); j—“田”字形小子域滤波与 90° 水平方向导数组合(combination of gridding small subdomain filtering and 90° horizontal direction derivative); k— 45° 水平方向导数法的处理结果(processing result of 45° horizontal direction derivative); l—“田”字形小子域滤波与 45° 水平方向导数组合(combination of gridding small subdomain filtering and 45° horizontal direction derivative); m— 135° 水平方向导数法的处理结果(processing result of 135° horizontal direction derivative); n—“田”字形小子域滤波与 135° 水平方向导数联合(combination of gridding small subdomain filtering and 135° horizontal direction derivative)

边界,但是异常的极大值带范围较宽,横向分辨率低(图3c);“田”字形小子域滤波与水平总梯度模组合处理的结果,在经过低通滤波强化重力异常梯级带的基础上再进行极大值的求取,增强了边缘识别结果的精度,达到清晰识别地质体边界的目的(图3d);解析信号振幅处理的结果显示地质体边界不连续,且异常的极大值带范围较宽,横向分辨率相比水平总梯度模结果更低(图3e);“田”字形小子域滤波与解析信号振幅组合处理的结果,同样是在强化重力异常梯级带的基础上再进行极大值的求取,与图3d中识别地质体边界的效果几乎一致(图3f),很好地提升了解析信号振幅法对断裂识别的分辨能力;不同方向的水平方向导数处理的结果(图3g、i、k、m)同样具有识别地质体边界不连续、异常的极值(极大或极小)带范围宽、横向分辨率低的特征;“田”字形小子域滤波与 0° 水平方向导数组合处理的结果很好地显示了横向的边界特征(图3h),与 90° 水平方向导数组合处理的结果很好地显示了纵向的边界特征(图3j),与 45° 和 135° 水平方向导数组合处理的结果能够较好地识别出整个地质体边界特征(图3l、n),但在极大与极小值处不连续。从以上结果分析可知,相比单独使用“田”字形小子域滤波法、水平总梯度模法、解析信号振幅法和水平方向导数法,采用模型试验中的组合方法进行处理可以很好地压制结果噪声,清晰地刻画地质体的边界,提高边界信息的横向分辨能力。其中“田”字形小子域滤波分别与水平总梯度模和解析信号振幅组合具有基本相同的效果,应用时可以选择其中一种,而“田”字形小子域滤波与水平方向导数组合可以依据研究需求来突出某一特定方向的构造特征,互相印证。

2.2.2 模型N试验结果

依据模型N的参数,正演获得地质体模型产生的重力异常(图4a,单位为mGal)。采用与模型M相同的处理方法,获得结果如图4b~n所示。

图4a与图3a异常结果相比,随着模型深度的加大,地质体2和3产生的异常中心变为一个,且异常形态更加圆滑,这样会使得识别边界更加困难。采用水平总梯度模、解析信号振幅和不同方向的水平方向导数进行处理,结果(图4c、e、g、i、k、m)显示,这3种常用断裂识别方法对浅部异常体1的边界都具有较好的识别效果,但是对于加大了埋藏深度的异常体2和3

的边界,都不具备识别能力。而先通过“田”字形小子域滤波处理,增强重力梯级带的信息,然后分别应用水平总梯度模、解析信号振幅和不同方向的水平方向导数进行二次处理,结果(图4d、f、h、j、l、n)表明,除了对浅部异常体1的边界具有较好的识别效果,对于加大了埋藏深度的异常体2和3的边界,此处异常等值线非常圆滑,使得处理结果有一定误差,但相比单独使用其中一种断裂识别方法,组合方法依然可以很好地压制结果噪声,提高边界信息的横向分辨能力,具备很好的识别能力。

3 应用实例

3.1 重力测量概况

在图1中重力测区内,采用 $500\text{ m} \times 250\text{ m}$ 测网布设1:5万高精度重力测量工作,测线方位角 126° ,采用CG-5型高精度重力仪进行测量。测区内以丘陵或低山为主,但中西部地形复杂,共完成重力测量面积 2130 km^2 ,测点17024个,质量检查点859个,质检比例5.04%,测点观测精度为 $\pm 0.026 \times 10^{-5}\text{ m/s}^2$,经各项改正精度计算后,布格重力异常总精度为 $\pm 0.041 \times 10^{-5}\text{ m/s}^2$,精度远高于规范要求,说明本次重力测量结果可靠性较高。

3.2 重力数据处理

为了验证组合方法的实际应用效果,以金羊盆地实测的布格重力异常数据处理为例。根据地质资料可知,该区重力低和重力高异常分别是凹陷和凸起构造的反映,而区内断裂主要为北东向和北西向,为查明研究区断裂构造格架,分别采用“田”字形小子域滤波法(滤波窗口为5点 $\times$ 5点,滤波2次)、“田”字形小子域滤波与水平总梯度模组合法、“田”字形小子域滤波与 45° 和 135° 水平方向导数组合法对布格重力异常进行处理,结果如图5所示。

由图5a可知,“田”字形小子域滤波法对布格重力异常的梯级带进行了紧缩,可以清晰地突出异常的界限特征。而区内重力异常总体呈西低东高的特征,西部重力异常低值带东翼变化较陡,西翼大多延伸出研究区,总体走向呈北东向展布,反映了区内低密度的中生界地层沉积,是盆地凹陷的主体区域;东部重力异常高值带规模较大,走向呈北东向,向东北延伸出研究区,主要由基底隆起引起。图5b是在“田”字形小子域

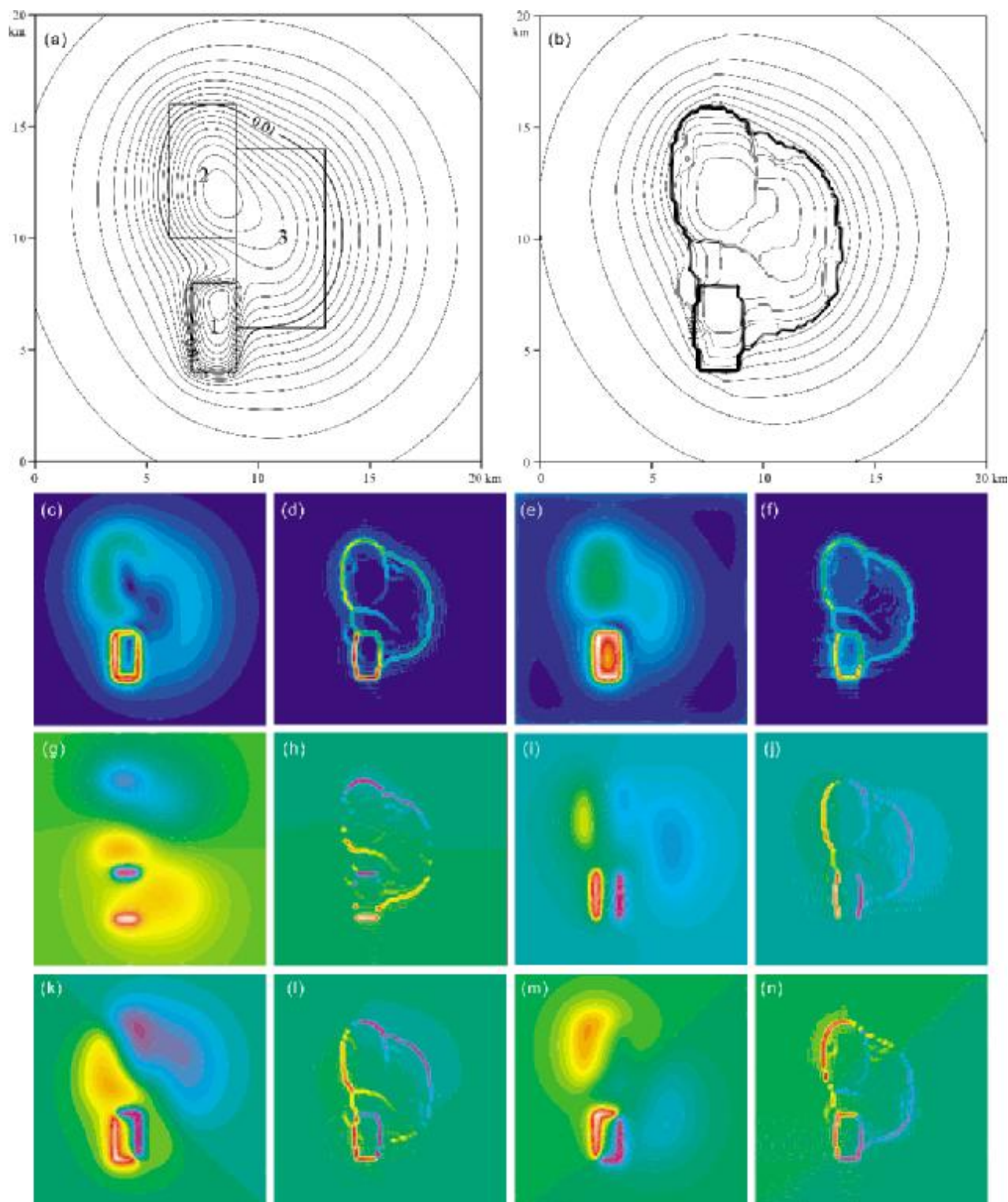


图 4 模型 N 重力异常及不同方法组合处理结果

Fig. 4 Gravity anomaly of model N and processing results for combination of different methods

a—模型及重力异常平面等值线图(model and gravity anomaly contour map); b—“田”字形小子域滤波法的处理结果(processing result of gridding small subdomain filtering); c—水平总梯度模法的处理结果(processing result of horizontal total gradient modulus); d—“田”字形小子域滤波与水平总梯度模组合(combination of gridding small subdomain filtering and horizontal total gradient modulus); e—解析信号振幅法的处理结果(processing result of analytical signal amplitude); f—“田”字形小子域滤波与解析信号振幅组合(combination of gridding small subdomain filtering and analytical signal amplitude); g— 0° 水平方向导数法的处理结果(processing result of 0° horizontal direction derivative); h—“田”字形小子域滤波与 0° 水平方向导数组合(combination of gridding small subdomain filtering and 0° horizontal direction derivative); i— 90° 水平方向导数法的处理结果(processing results of 90° horizontal direction derivative); j—“田”字形小子域滤波与 90° 水平方向导数组合(combination of gridding small subdomain filtering and 90° horizontal direction derivative); k— 45° 水平方向导数法的处理结果(processing results of 45° horizontal direction derivative); l—“田”字形小子域滤波与 45° 水平方向导数组合(combination of gridding small subdomain filtering and 45° horizontal direction derivative); m— 135° 水平方向导数法的处理结果(processing results of 135° horizontal direction derivative); n—“田”字形小子域滤波与 135° 水平方向导数联合(combination of gridding small subdomain filtering and 135° horizontal direction derivative)

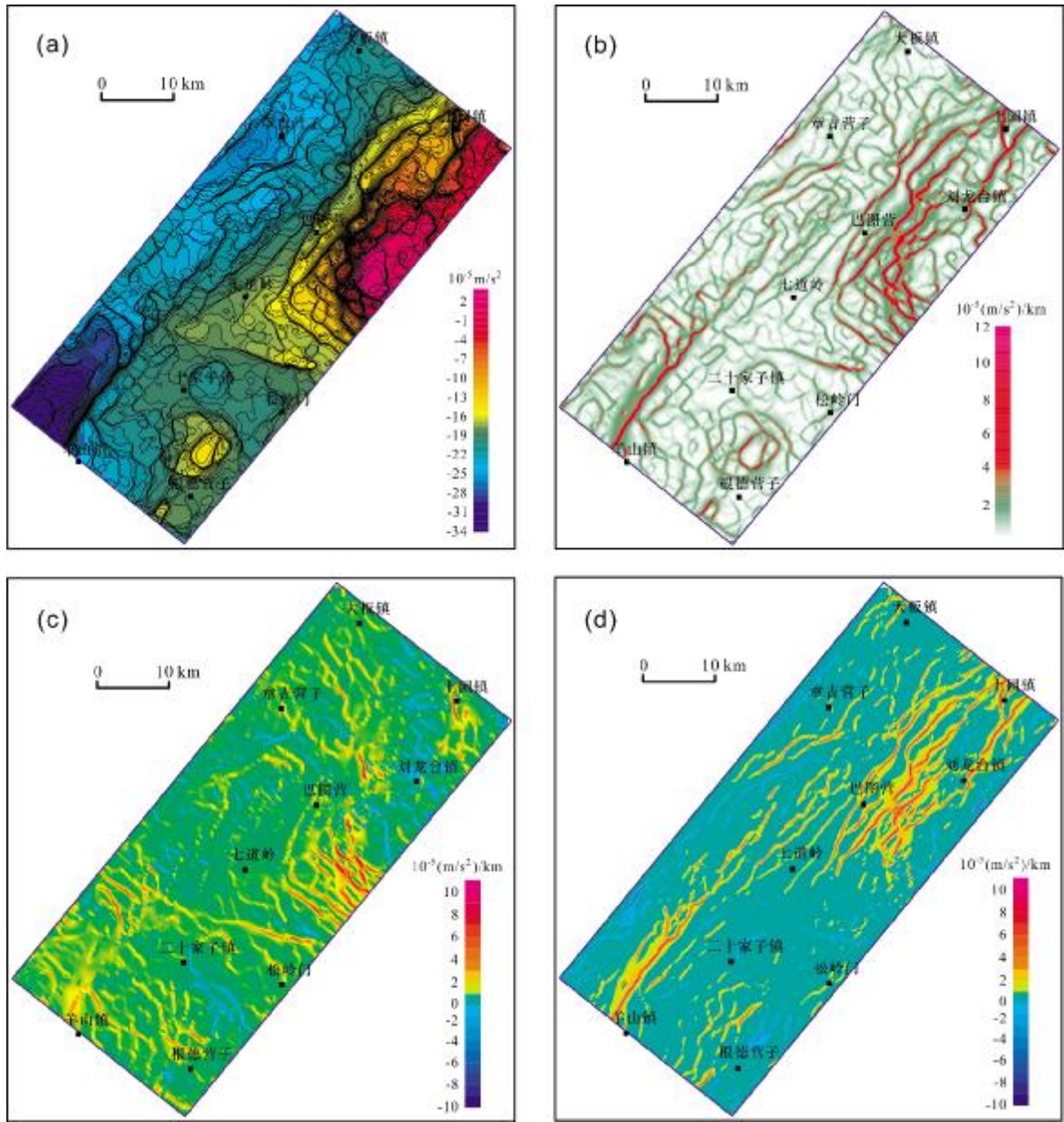


图 5 实测布格重力异常处理结果

Fig. 5 Processing results of measured Bouguer gravity anomaly

a—“田”字形小子域滤波法的处理结果(processing result of gridding small subdomain filtering); b—“田”字形小子域滤波与水平总梯度模组合法的处理结果(processing result of gridding small subdomain filtering combined with horizontal total gradient modulus); c—“田”字形小子域滤波与 45°水平方向导数组合法的处理结果(processing result of gridding small subdomain filtering combined with 45° horizontal direction derivative); d—“田”字形小子域滤波与 135°水平方向导数组合法的处理结果(processing result of gridding small subdomain filtering combined with 135° horizontal direction derivative)

滤波的基础上再进行水平总梯度模的二次处理, 将紧缩后的重力异常梯级带转换为重力异常极大值带, 与图 5a 中的结果相对比, 重力异常的线性异常信息反映得更加清晰、直观, 提高了对异常边界的分辨能力. 图 5c 和图 5d 是在“田”字形小子域滤波的基础上再分别进行 45°和 135°水平方向导数的二次处理, 针对测区

两个主要的构造方向, 进一步增强线性异常信息, 清晰地反映了研究区北东向和北西向相互交汇的分布特征.

3.3 研究区断裂构造格架

依据重力数据处理结果进行断裂的综合划分和识别, 推断研究区的断裂构造格架. 由于区内断裂十分

发育,共识别出主要断裂 28 条(图 6),按照先北东向主干断裂,后北西向断裂,由西向东、由南向北的顺序进行编号。

从图 6 可以看出,研究区主要由北东向和北西向的两组断裂共同控制,而北东向断裂多被北西向断裂错断成多段。因此,北东向断裂为早期断裂,北西向断裂为后期断裂,这与前人对该区的断裂构架认识一致。该区断裂主要对金羊盆地的构造形态进行后期的多次改造,与北西向断裂相比之下,北东向断裂对盆地的发展影响较大,局部影响了凸起与凹陷的边界。其中,F1、F2、F5、F7、F8 断裂为本区主要的构造单元边界。F1 断裂位于研究区西缘的南部,呈北东向展布,被 F19、F22 等北西向断裂平移错断为多段。在“田”字形小子域滤波与水平总梯度模组合法的处理结果(图 5b)中有连续的极大值线性异常,在重力 135°水平方向导数上也有较清晰且连续的极小值线性异常(图 5d)。推测为南天门断裂带东缘隐伏的次级断裂。F2 断裂位于研究区西缘的北部,呈北东向展布,断距较大,被北西向断裂平移错断为多段。在图 5b 中有连续的极大值线性异常,在图 5d 中有较清晰且连续的极小值线性异常。推测该断裂同样为南天门断裂带东缘隐伏的次级断裂。F5 断裂位于研究区南部,呈北东向展布,断距较大,被北西向断裂 F19、F22、F23 等平移错断为多段。该断裂的西部表现为重力低异常、东部为重力高异常(图 5a),在图 5b 和图 5d 中都有较清晰且连续的极大值线性异常。推断该断裂的上盘使断层的东侧形成凸起,西侧与 F1 断裂对冲形成凹陷。F7 和 F8 断裂位于研究区东缘的北部,呈北东向展布,被北西向断裂平移错断为多段,为一组平行断裂。在平行断裂的西部表现为重力低异常,东部为明显的重力高异常(图 5a),在图 5b 和图 5d 中都有较清晰且连续的极大值线性异常。推断 F7、F8 断裂使东部地层抬升,为西侧章吉营子凹陷和东侧刘龙台凸起的分界带。在凹陷或凸起的内部存在着许多小的局部构造。如位于研究区西北部的 F3 和 F4 断裂,呈北东向展布,位于章吉营子凹陷内。在图 5a 中表现为狭长的重力高异常条带,在图 5b 和图 5d 中都有较清晰且连续的极值线性异常。推断 F3 与 F4 断裂背冲而形成凸起带,将章吉营子凹陷分成两个次级凹陷。

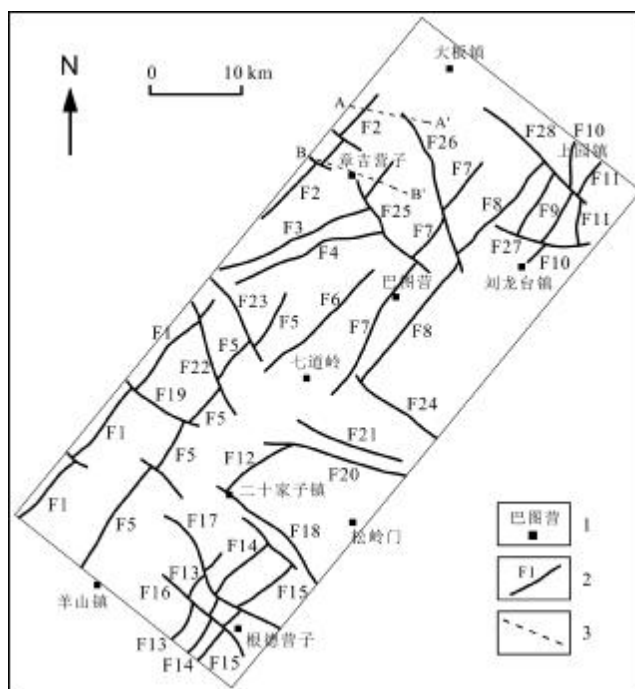


图 6 研究区推断断裂构造分布图

Fig. 6 Distribution of inferred fault structures in the study area
1—地名(place name); 2—断裂及编号(fault and number); 3—地震剖面(seismic section)

3.4 地震剖面的证据

为验证组合方法在金羊盆地划分断裂构造的有效性,笔者收集了过研究区北部的 2 条地震剖面,其位置见图 6。

图 7 为利用 2 条地震剖面确定的断裂,其中地震 A-A'剖面穿过图 6 中推断的 F2 和 F26 两条断裂,剖面呈北西西向展布,位于章吉营子凹陷的北侧;地震 B-B'剖面穿过图 6 中推断的 F2 和 F3 两条断裂,与 A-A'剖面展布方向基本平行,位于章吉营子凹陷内。综合考虑 2 条地震剖面中断裂的产状以及 F2、F3 和 F26 断裂在重力异常中的位置,可以确认地震 A-A'剖面中解译的断裂即为图 6 中的断裂 F2 和 F26;地震 B-B'剖面中解译的断裂与图 6 中断裂 F2、F3 相一致,且断裂 F2 和 F3 之间清楚地显示了凹陷的存在。显然,图 6 中推断出的断裂与地震确认的断裂具有很好的对应关系。

4 结论

1)本研究模型结果表明,与单独使用断裂识别方法相比,将已有常用的断裂识别方法进行组合应用,处

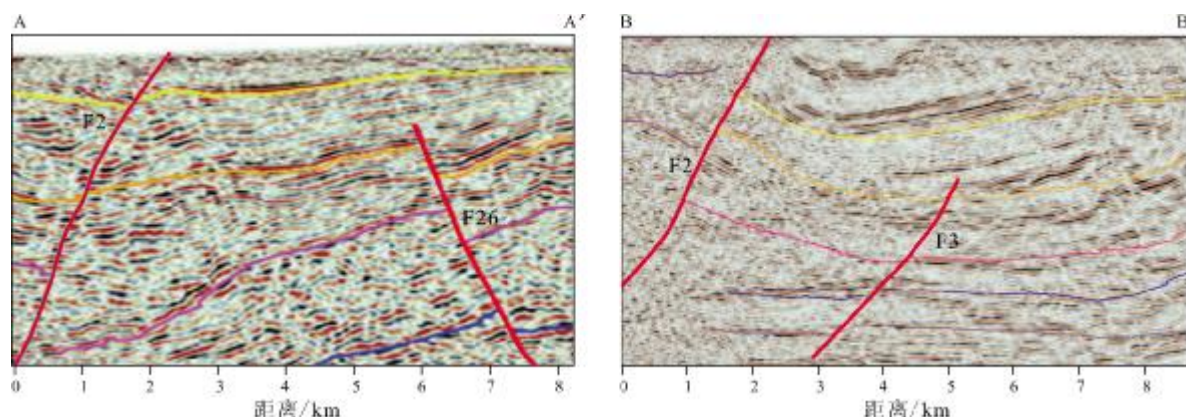


图7 地震剖面确定的断裂

Fig. 7 Faults determined by seismic sections

理结果能够清晰、直观地显示出地质体的边界特征,对弱异常边界的识别依然有效。

2)应用组合方法重新对金羊盆地的断裂系统进行划分,厘定了该区的构造格架。对推断结果与地震资料进行印证,证明了文中几种断裂识别方法组合应用的有效性和实用性。

3)应用实践结果说明,在研究断裂识别新方法的同时,对已有常用的断裂识别方法的作用进行充分发掘,也是非常有必要的。

参考文献:

- [1]曾华霖.重力场与重力勘探[M].北京:地质出版社,2005:6-7.
- [2]赵希刚,吴汉宁,柏冠军,等.重磁异常解释断裂构造的处理方法及图示技术[J].地球物理学进展,2008,23(2):414-421.
- [3]杨高印.位场数据处理的一项新技术——小子域滤波法[J].石油地球物理勘探,1995,30(2):240-244.
- [4]马涛,王铁成,王雨.一种改进的网格数据保持梯度滤波方法[J].石油地球物理勘探,2007,42(2):198-201.
- [5]张凤旭,张凤琴,刘财,等.断裂构造精细解释技术——三方向小子域滤波[J].地球物理学报,2007,50(5):1543-1550.
- [6]肖锋,吴燕冈,孟令顺.位场数据处理中小子域滤波的改进[J].石油地球物理勘探,2010,45(1):136-139.
- [7]马国庆,杜晓娟,李丽丽.优化小子域滤波方法研究及其应用[J].石油地球物理勘探,2013,48(4):658-662.
- [8]蔡钟,倪小东.重力异常处理中小子域滤波法的改进[J].河北工程大学学报(自然科学版),2015,32(4):47-51.
- [9]许海红,李玉宏,袁炳强,等.位场数据小子域滤波法处理效果对比

与优选[J].地质通报,2018,37(1):153-164.

- [10]郇恒飞.重力数据综合处理与解释在钾盐矿区的应用研究[D].长春:吉林大学,2013.
- [11]Cordell L. Gravimetric expression of graben faulting in Santa Fe Country and the Espanola Basin, New Mexico [C]//Proceedings of New Mexico Geological Society Guidebook, 30th Field Conference. Santa Fe Country: New Mexico Geological Society, 1979:59-64.
- [12]Nabighian M N. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation[J]. Geophysics, 1972,37(3):507-517.
- [13]穆石敏,申宁华,孙运生.区域地球物理数据处理方法及其应用[M].长春:吉林科学技术出版社,1990:22-23.
- [14]崔瑞华,谷社峰,李成立.综合物探在滨北地区基底结构研究中的应用[J].大庆石油地质与开发,2011,30(1):170-174.
- [15]许海红,袁炳强,杨高印,等.小子域滤波联合总水平导数在重力资料处理中的应用——以内蒙古银额盆地EQ区块断裂构造识别为例[J].地质通报,2014,33(11):1853-1860.
- [16]何保,付秋萍,张亚明.辽西金羊盆地北票组烃源岩分布及有机质丰度[J].辽宁工程技术大学学报,2006,25(1):24-27.
- [17]李月新.辽西金羊盆地重力异常解释推断及油气资源预测[J].中国科技博览,2010(21):107-108.
- [18]孙守亮,李永飞,郇晓勇,等.辽西金羊盆地地下侏罗统北票组页岩气地球化学特征及其成因[J].地质通报,2017,36(4):575-581.
- [19]李永飞,陈树旺.辽西地区金岭寺——羊山盆地油气资源调查新发现[J].地质通报,2014,33(9):1463-1464.
- [20]孙守亮,李永飞,陈树旺,等.金羊盆地北票组沉积环境及烃源岩有机地球化学特征[J].世界地质,2017,36(3):889-902.