

张量曲率边界识别方法在煤田火烧区磁异常中的应用

闫建波¹, 周文纳²

1. 宁夏回族自治区煤田地质局, 银川 750001

2. 兰州大学地质科学与矿产资源学院, 甘肃省西部矿产资源重点实验室, 兰州 730000

摘要 为了准确识别煤田火烧区边界位置, 对火烧区磁异常进行更加精细的解释, 将张量曲率边界识别方法引入到煤田火烧区磁异常的解释中, 探讨分析煤田火烧区磁异常的张量曲率特征。根据煤田火烧区磁异常的特点, 利用张量曲率的较大特征值和较小特征值分别圈定煤田火烧区和正常区。模型试验中, 通过与常用的 Theta 图以及垂向导数等方法对比, 体现了张量曲率分析方法在地质体边界识别中的优越性, 验证了该方法在火烧区边界识别中的有效性。将该方法应用于乌达某煤田实测磁异常数据的解释, 发现利用该方法圈定的火烧区范围和其他勘探结果以及已知地质资料相符, 说明该方法可以准确有效地识别煤田火烧区和正常区边界范围, 为煤田火烧区的磁异常解释提供很好的依据。

关键词 张量曲率矩阵; 煤田火烧区; 磁异常; 边界识别

中图分类号 P631.2*21

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.31.011

Application of Curvature Gradient Tensor Matrix in Magnetic Anomaly of Burnt Coal Area

YAN Jianbo¹, ZHOU Wenna²

1. Ningxia Bureau of Coal Geological Exploration, Yinchuan 750001, China

2. Key Laboratory of Mineral Resources in Western China (Gansu Province); School of Earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract This paper introduces the curvature gradient tensor matrix (CGTM) method to identify the edge of burnt coal areas more accurately and to interpret the magnetic anomaly in more detail. The characteristics of CGTM of the magnetic anomaly in the burnt coal areas are discussed and analyzed. The characteristics indicate that the larger and smaller eigenvalues of CGTM can be used to identify the burnt coal areas and normal areas of the coalfield. In the model tests, the Theta map and vertical derivative edge detection methods were compared with the CGTM. The results demonstrate that the CGTM method is superior in edge detection of geological sources. The effectiveness of the method was also demonstrated. Finally, the method was applied to interpretation of the magnetic anomaly of Wuda coalfield. The results obtained by CGTM method had good agreement with other known geological data. It shows that the method could accurately and effectively identify the edge of coalfield fire areas and normal areas, and is useful for interpreting the magnetic anomaly of coal fire areas.

Keywords curvature gradient tensor matrix; burnt area of coalfield; magnetic anomaly; edge detection

煤炭是中国的主要能源, 合理地开采和利用煤炭资源可以为国家经济的发展提供重要的物质基础。但在煤田区, 煤层自然是极其普遍的现象, 往往造成大量煤炭资源损失, 危

害生态环境, 而且极大影响煤炭储量的计算和煤炭资源的合理利用。确定煤田火烧区的位置和范围, 可以为及时制定遏制和灭火措施, 确保煤田区的安全以及避免资源的浪费提供

收稿日期: 2014-05-15; 修回日期: 2014-07-08

作者简介: 闫建波, 助理工程师, 研究方向为煤田、矿产等地球物理勘探, 电子信箱: lao_86@126.com; 周文纳 (通信作者), 讲师, 研究方向为重、磁及其梯度张量数据处理及解释, 电子信箱: wenna@163.com

引用格式: 闫建波, 周文纳. 张量曲率边界识别方法在煤田火烧区磁异常中的应用[J]. 科技导报, 2014, 32(31): 75-79.

依据。

磁法勘探是煤田火烧区圈定的常用地球物理方法^[1,2]。在火烧区,煤层自燃后,岩石因受到高温后发生变质,形成含铁磁性的矿物烧变岩。当温度降低后,具有较强的热剩磁,通常可以形成明显的磁异常。一些学者对煤田火烧区的磁测数据进行了大量的研究,在区分正常含煤区和火烧区等方面取得了一定的成果^[3-6]。但通常直接利用磁异常或利用垂向导数等对火烧区磁异常进行研究,进而判定含煤区和火烧区。这些传统的解释方法易受人为主观因素影响,或因方法本身的限制,对火烧区磁异常的判定误差较大。

边界识别方法作为重要的确定地质体水平面内位置以及场地质体边界的方法,在构造识别、地质体边界确定等问题的研究中有着重重要的应用。张量曲率矩阵是基于张量梯度水平分量建立的理论,因其利用了梯度张量的高分辨率能力以及多分量联合解释的优势,在异常深度计算和边界识别中均有着重要的应用。Oruç等^[7]利用其特征值进行边界识别,判定研究区的构造特征。在此基础上,Zhou等建立了更加快捷的适用于重力异常的边界识别方法^[8],同时将该方法应用于煤田采空区重力异常数据的深度计算中^[9],取得了良好的效果。该方法具有分辨能力高、识别准确等特点。在高精度数据解释中,该方法具有更加突出的优势。

本文基于煤田火烧区磁异常的特殊性质,利用张量曲率矩阵方法对高精度磁测数据进行分析,进而识别判断煤田火烧区与正常区。在模型试验的基础上,应用该方法解释乌达某煤田区磁测资料。

1 磁异常张量曲率矩阵理论

梯度张量数据是重力、磁位在3个坐标轴方向的二阶偏导数,反映了异常在空间的变化率,具有更多高频信息。

磁梯度张量是磁位二阶偏导数,可以用矩阵形式表示为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{xx} & A_{xy} & A_{xz} \\ A_{yx} & A_{yy} & A_{yz} \\ A_{zx} & A_{zy} & A_{zz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{A}$ 为磁位, A_{ij} 分别为各个方向的导数,式(1)矩阵为对称矩阵,且满足拉普拉斯方程 $A_{xx} + A_{yy} + A_{zz} = 0$ 。

根据张量曲率在重力异常数据中的描述,同样可以得到在磁异常数据中,张量曲率矩阵表达式为

$$\mathbf{\Gamma}_{\text{CGTM}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial A_x}{\partial x} & \frac{\partial A_x}{\partial y} \\ \frac{\partial A_y}{\partial x} & \frac{\partial A_y}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{xx} & A_{xy} \\ A_{yx} & A_{yy} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, A_x 和 A_y 为水平磁异常矢量,而 $\partial A_x/\partial x$ 、 $\partial A_x/\partial y$ 、 $\partial A_y/\partial x$ 和 $\partial A_y/\partial y$ 是磁异常水平和垂向矢量分别在 x 和 y 方向的一阶导数。由张量矩阵可知 $A_{xy} = A_{yx}$ 。

矩阵 $\mathbf{\Gamma}_{\text{CGTM}}$ 的特征值为

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)特征值满足

$$\det(\mathbf{\Gamma}_{\text{CGTM}} - \mathbf{\Lambda}) = \begin{vmatrix} A_{xx} - \lambda & A_{xy} \\ A_{yx} & A_{yy} - \lambda \end{vmatrix} = 0 \quad (4)$$

式中 λ 为矩阵的特征值。

求解式(4)可以得到2个特征值,分别为

$$\lambda_1 = \frac{1}{2} \left(A_{xx} + A_{yy} + \sqrt{(A_{xx} - A_{yy})^2 + 4A_{xy}^2} \right) \quad (5)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{2} \left(A_{xx} + A_{yy} - \sqrt{(A_{xx} - A_{yy})^2 + 4A_{xy}^2} \right) \quad (6)$$

在重力异常的解释中,式(5)所示的 λ_1 可用于正异常的圈定,而式(6)所示的 λ_2 可用于负异常边界的圈定。因为在数据解释中,化极磁力异常与重力异常具有很多相似性,利用这一特性,同样可以用特征值圈定磁性异常体的边界,即利用 λ_1 确定火烧区(正异常)边界,利用 λ_2 确定正常区(负异常)边界,而这两者之间的位置,可认定为过渡带。

2 模型试验

为了模拟煤田火烧区的磁异常情况,检验磁异常张量曲率矩阵理论方法在火烧区磁异常数据解释中的可靠性,建立了以下的模型。模型由4个直立棱柱体组成,棱柱体中心埋深均为150 m,设定棱柱体均为垂直磁化,其中1和3棱柱体产生正磁异常,而2和4棱柱体产生负磁异常,分别对应煤田的火烧区和正常区。棱柱体水平位置如图中虚线矩形所示,其磁异常如图1(a)所示。

分别利用Theta图方法和垂向一阶导数方法进行边界识别,其结果如图1(b)所示。Theta图方法极大值位置和垂向一阶导数零等值线位置(图中黑色线所示)对应地质体边界位置,可以看出,Theta图方法和垂向一阶导数零等值线位置对应较好,但和实际地质体位置均有较大的误差,而且两种方法均产生了虚假的边界。另外,当地质体位置较近时(棱柱体1和2),Theta图极大值位置重叠在一起,严重影响对目标地质体边界位置的判定。而图1(c)为较大特征值所得结果(图中黑实线所示)很好地划分出了正磁异常地质体的边界位置,相较于前面2种方法,其精度更高,不产生重叠和虚假边界位置。图1(d)为较小特征值所识别的负磁异常地质体的边界(图中黑实线所示),从中可以看出,较小特征值同样可以很好地判定出异常源的位置和边界。

为了更进一步验证噪音的影响,在上述图1(a)磁异常中,加入最大幅值0.05%的噪音,得到如图2(a)所示的磁异常。同样,利用Theta图和垂向一阶导数进行地质体边界位置识别,结果如图2(b)所示,虽然这2种方法识别出地质体的大致边界位置,但因受到噪音的干扰,垂向一阶导数的结果并不理想,很难正确判断边界的准确位置,Theta图方法结果误差也较大。图2(c)、(d)分别为利用较大特征值和较小特征值识别的边界位置(图中黑实线所示),可以看出,边界位置和地质体真实边界位置对应,且受到噪音干扰较少,可以很好地判断地质体所在的位置,并准确地给出边界位置。

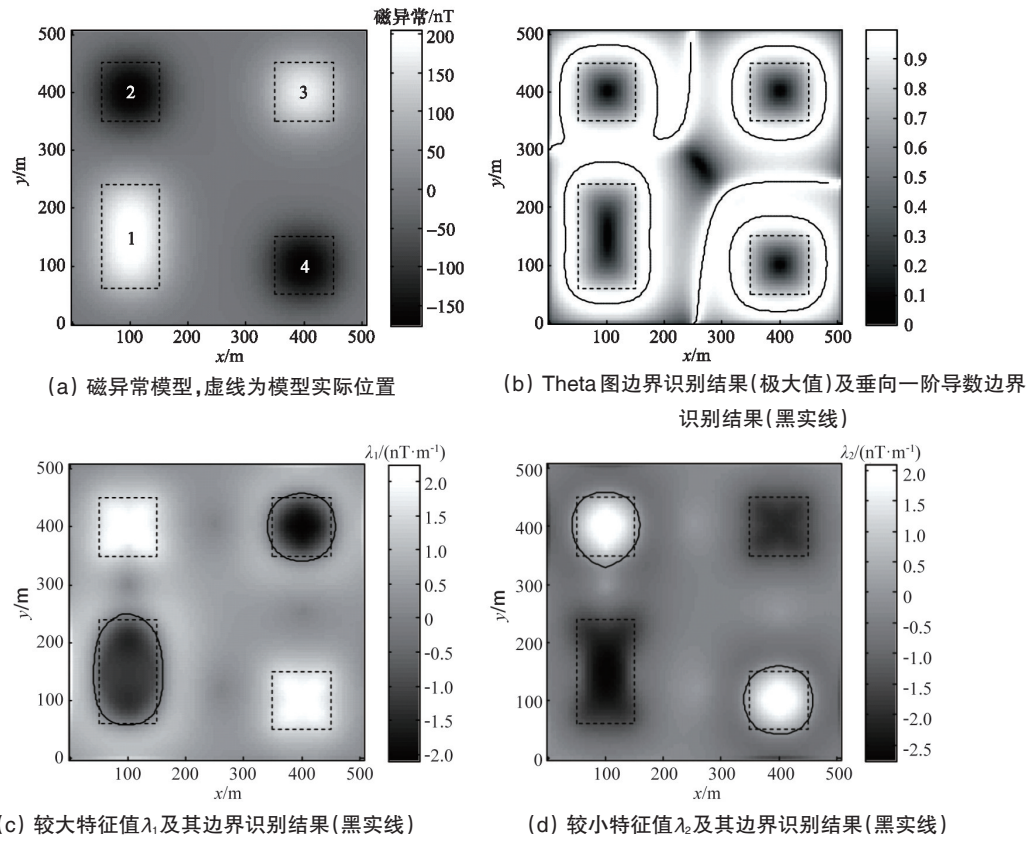


图1 磁异常模型及不同方法边界识别结果

Fig. 1 Magnetic anomaly of the model and edge detection results from different methods

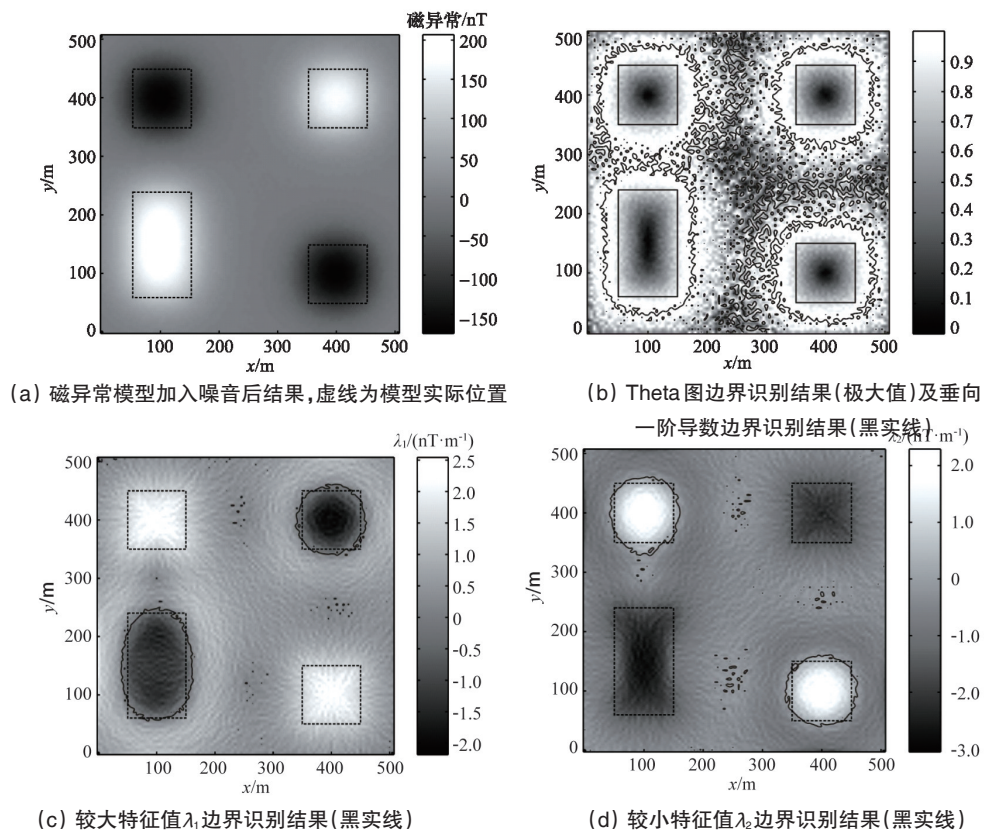


图2 磁异常模型加入噪声后边界识别结果

Fig. 2 Magnetic anomaly of the model with random noise and edge detection results from different methods

3 实际应用

乌达地区有丰富的煤矿资源,该区地层由老至新依次为本溪组、太原组、山西组、石盒子组、第三系和第四系,而煤层主要含在山西组中,本组煤层总厚十多米,是煤田主要可采煤层。但该地区煤田煤火自燃现象较为严重,长期吞噬着乌达煤田蕴藏的宝贵煤炭资源,并限制煤层的开采,直接威胁煤矿安全生产。为了探明煤火区的位置和燃烧范围,在乌达某煤田区进行放射性勘探,高精度磁测以及其它地质调查,其后也进行了相应的钻探验证。

高精度磁异常测量点距为 10 m,线距为 50 m。在原始磁测异常基础上,进行化极并去区域场后得到如图 3(a)所示的局部磁异常,其中有大量的高磁异常区,根据火烧区具有高

磁异常这一特征,可以大致确定其为烧变区,但具体边界位置却不能准确地判断。若利用 Theta 图或者垂向一阶导数等传统的边界识别方法进行判别,如图 3(b)所示,Theta 图极大值和垂向一阶导数零等值线位置对应良好,均反映了地质体的边界位置。但这些方法所识别的地质体边界位置均向外发生较严重的偏移,导致高异常区和低异常区之间的过渡带不明显,不能很好地区分出高磁异常区(火烧区)、低磁异常区(正常区)以及过渡带的范围。为此,利用张量曲率特征值的方法对高磁异常区和低磁异常区分别进行圈定和划分。图 3(c)为较大特征值 λ_1 所识别的正磁异常区域,判定为火烧区位置,这些位置范围和正磁异常区对应良好。图 3(d)为较小特征值 λ_2 所识别的负磁异常区域,对应为煤田正常区。

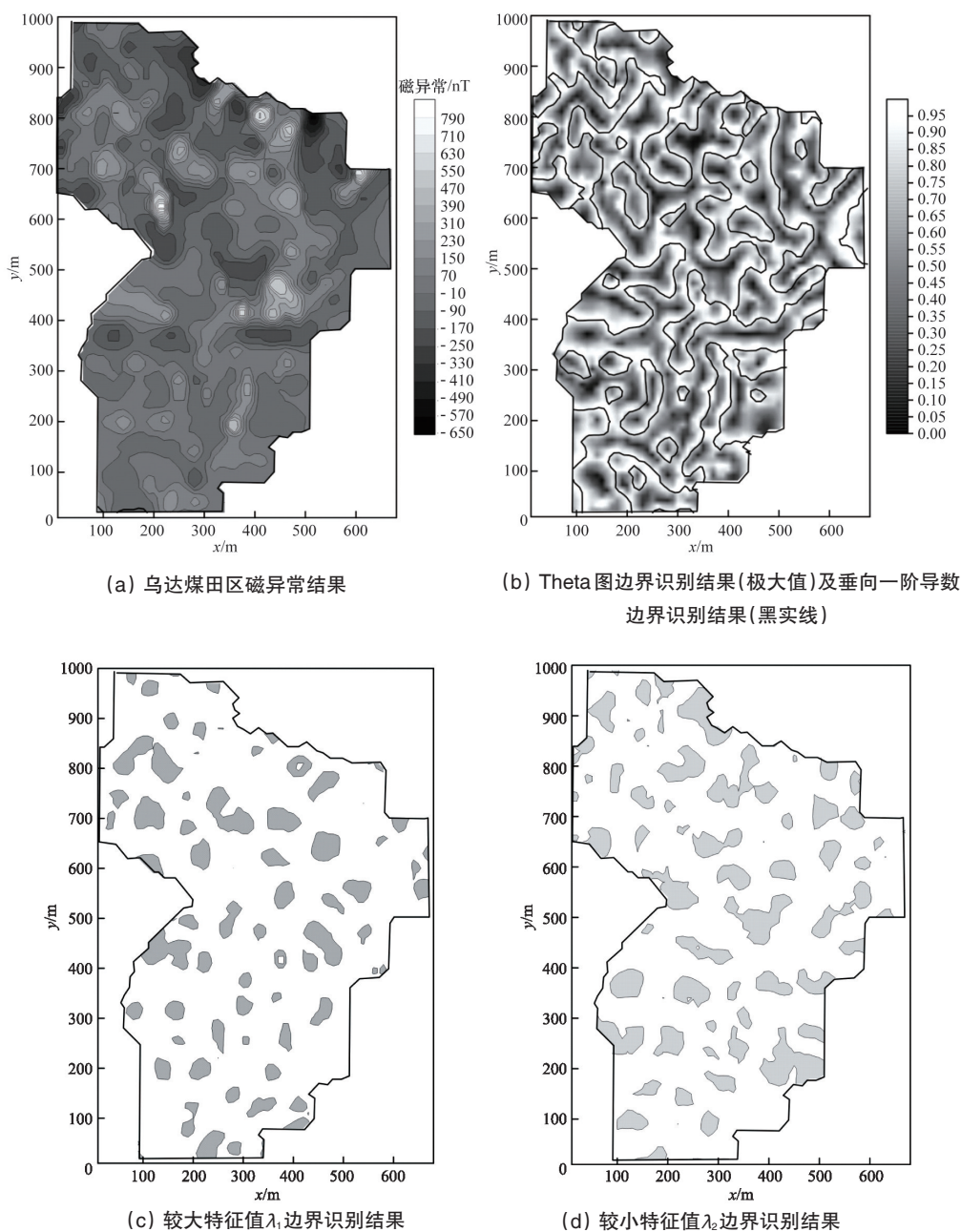


图3 乌达地区实测磁异常及边界识别结果

Fig. 3 Real magnetic anomaly of Wuda area and edge detection results

分析结果显示,通过张量曲率边界识别方法可以很好地确定煤田火烧区和正常区的具体位置。相较于Theta图及垂向一阶导数识别结果,张量曲率方法边界识别结果更加精细且方便解释。对所判定划分的火烧区范围与相应的地质资料结果相符。因此在火烧区磁异常的解釋中,张量曲率分析方法具有良好的应用效果,可得到可靠准确的结果。

4 结论

磁法勘探在煤田火烧区探测中具有重要的作用,利用磁异常可以有效圈定火烧区范围,为煤炭资源的勘探利用以及储量预测等提供依据。为了更加准确有效地圈定火烧区的位置和范围,本文引入曲率张量方法对煤田火烧区磁异常进行判定和识别,模型试验和实际数据对比结果表明,利用曲率张量较大特征值可以圈定火烧区的范围,而利用较小特征值可以很好地圈定煤层正常区的范围。相较于常用的传统方法Theta图和垂向一阶导数等边界识别方法,利用曲率张量方法可以得到更加准确的边界识别结果。

参考文献(References)

- [1] 朱晓颖, 于长春, 熊盛青, 等. 磁法在煤火探测中的应用[J]. 物探与化探, 2007, 31(2): 115-119.
Zhu Xiaoying, Yu Changchun, Xiong Shengqing, et al. The application of the magnetic method to the detection of under ground coal fires[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2007, 31(2): 115-119.
- [2] 董守华, 李志聘, 邵玉宏. 火烧区烧变岩多边形体 ΔT 人机联作最优反演[J]. 煤炭学报, 1996, 21(2): 124-127.
Dong Shouhua, Li Zhidan, Shao Yuhong. Interactive inversion method for polygonal body ΔT of the burnt rocks in a fire area[J]. Journal of

- China Coal Society, 1996, 21(2): 124-127.
- [3] 陈敏, 邵伟. 应用地面磁法圈定煤田火区边界[J]. 物探与化探, 2010, 34(1): 89-92.
Chen Min, Shao Wei. The application of the ground magnetic method to the exploration of fire area boundary of the coal field[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2010, 34(1): 89-92.
- [4] 李曼, 刘天佑. 煤田烧变岩非均匀磁化的二重半模型反演[J]. 煤田地质与勘探, 2006, 34(2): 67-69.
Li Man, Liu Tianyou. Variable magnetization interactive inversion method by 2.5 D for burnt coal[J]. Coal Geology & Exploration, 2006, 34(2): 67-69.
- [5] 吴晓瑞, 刘岩波, 高峰. 地面高精度磁测在划定煤田火烧区中的应用[J]. 中州煤炭, 2013(6): 62-64.
Wu Xiaorui, Liu Yanbo, Gao Feng. Application of high precision ground magnetic survey in demarcation of burnt coal area[J]. Zhongzhou Coal, 2013(6): 62-64.
- [6] 刘大为, 刘天佑, 董建华. 小波多尺度分析在煤田火烧区磁法探测中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(6): 61-63.
Liu Dawei, Liu Tianyou, Dong Jianhua. Application of wavelet multi-scale analysis in magnetic prospecting of the burnt coal area[J]. Coal Geology & Exploration, 2005, 33(6): 61-63.
- [7] Oruç B, Sertcelik I, Kafadar O, et al. Structural interpretation of the Erzurum Basin, eastern Turkey, using curvature gravity gradient tensor and gravity inversion of basement relief[J]. Journal of Applied Geophysics, 2013, 88: 105-113.
- [8] Zhou W N, Du X J, Li J Y. The limitation of curvature gravity gradient tensor for edge detection and a method for overcoming it[J]. Journal of Applied Geophysics, 2013, 98: 237-242.
- [9] Zhou W N, Li J Y. Semiautomatic interpretation of microgravity data from subsurface cavities using curvature gradient tensor matrix[J]. Near Surface Geophysics, 2014(12), DOI: 10.3997/1873-0604.2014021.

(编辑 陈华媛)

·学术动态·



中国科学技术协会

中国科协第282次“青年科学家论坛”研讨 “化学与生物和能源的交叉与融合”

2014年8月23—25日,主题为“化学与生物和能源的交叉与融合”的中国科协第282次“青年科学家论坛”在兰州召开,中国科学院化学研究所研究员李志波、清华大学教授王训、中国科学院上海有机化学研究所研究员游书力、北京大学教授侯仰龙、中国科学院兰州化学物理研究所研究员周峰担任论坛主席,70余名国家杰出青年基金获得者、优秀青年基金获得者和在各自领域做出突出研究成果的青年化学家与会交流。

本次论坛主要分析了化学与生物和能源交叉领域最新发展动态,并重点针对以下3个议题进行了讨论:1) 化学如何与生命科学结合产生新的前沿研究方向;2) 在应对能源紧缺的重大战略方面,化学家应该如何合作,创造新的材料,用于解决能源问题,包括储能和太阳能利用等方面;3) 西部地区资源能源的开发与利用,以及化学如何为西部能源有效利用服务。

详见中国科协网<http://www.cast.org.cn/n35081/n35533/n38560/15946217.html>。