

曹代勇,杨光,豆旭谦,等. 基于遥感技术的内蒙古乌达煤田火区碳排放计算[J]. 煤炭学报,2014,39(12):2489-2494. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.1840

Cao Daiyong, Yang Guang, Dou Xuqian, et al. Calculation of carbon emission of Wuda coalfield fires in Inner Mongolia based on remote sensing technology[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(12): 2489-2494. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.1840

基于遥感技术的内蒙古乌达煤田火区碳排放计算

曹代勇¹, 杨光¹, 豆旭谦¹, 宋现锋², 杜晓敏¹

(1. 中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 2. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 为了获得煤田火区的碳排放量,建立了计算煤田火区 CO₂ 排放通量法模型,其中,确定火区面积是该模型的关键基础参数。采用 2011-01-24 的 ASTER L1B 热红外遥感数据反演内蒙古乌达煤田火区的地表温度,提出基于梯度的自适应阈值法,以热红外图像梯度极值为阈值圈定火区范围,估算得到乌达煤田火区面积为 239.6 hm²。利用排放通量法模型,依据遥感和其他手段获得的基础参数数据,计算了乌达煤田火区的碳排放量,结果显示乌达煤田火区每年的 CO₂ 碳排放量达 37.9×10^4 t。

关键词: 碳排放; 乌达煤田; ASTER 热红外遥感; 煤田自燃

中图分类号: P66

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2014)12-2489-06

Calculation of carbon emission of Wuda coalfield fires in Inner Mongolia based on remote sensing technology

CAO Dai-yong¹, YANG Guang¹, DOU Xu-qian¹, SONG Xian-feng², DU Xiao-min¹

(1. College of Geoscience & Surveying Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. College of Natural Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This paper aims to put forward an emission flux method for calculating the amount of CO₂ carbon emission in coalfield fires. In this method, the area of coalfield fires is an essential modeling parameter. In order to obtain this basic data, the thermal infrared remote sensing data on January 24, 2011 obtained by Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) were used to inverse the surface temperature of fires in Wuda coalfield, Inner Mongolia, China. Then a Self-Adaptive Gradient Based Thresholding method was applied to segment the thermal infrared image by a threshold, the mean temperature of the extreme gradient points for the temperature image. This threshold was applied to delineate the coalfield fire areas. The total area of coalfield fires in Wuda coal field was estimated as 239.6 hm² in January 2011. Through the emission flux method and basic parameters generated by the density model of the fissures in the coalfield, the amount of CO₂ carbon emissions by coalfield fires in Wuda coalfield was estimated and the result shows that the annual equivalent carbon dioxide emission in Wuda coalfield fires is up to 37.9×10^4 tons.

Key words: carbon emissions; Wuda coalfield; ASTER thermal infrared remote sensing; coalfield spontaneous combustion

收稿日期: 2013-12-13 责任编辑: 韩晋平

基金项目: 中国科学院战略先导科技专项资助项目(XDA05030200)

作者简介: 曹代勇(1955—),男,重庆人,教授,博士生导师。Tel: 010-62339301, E-mail: cdy@cumt.edu.cn

煤田自燃不仅破坏了宝贵的煤炭资源^[1],而且向大气中排放了大量的温室气体^[2-4]。煤田火区碳排放问题已经引起了国际社会的高度重视。由于煤层自燃气体排放系统的复杂性,其碳排放量的计算是一个尚未解决的难题。笔者^[5]提出了通过烧失煤量法估算煤田自燃中碳排放量的计算模型,并在明确煤田火区定义的基础上,给出了计算模型的关键技术流程。Mark A. Engle 等^[6]通过监测火区地表出口处浓度和垂直地表气体流速的方法计算碳排放量。

遥感在煤田火区碳排放量的计算中具有快捷、方便、经济的特点^[7],前人应用热图像数据集,使用控制模型仿真预测煤火的位置与实际探测到的热点重叠,并使用辐射转换模型来识别 CO₂ 吸收带^[8]。笔者使用 ASTER 热红外遥感数据反演煤田火区温度,通

过统计学方法得到的阈值来圈定煤田火区(异常区)的面积,为采用排放通量法计算煤田火区碳排放量提供基础数据。

1 研究区概况

乌达煤田位于内蒙古自治区西部乌海市乌达区境内,是全球范围内较大的煤田火区之一,也是被最广泛研究的区域之一^[9]。它位于贺兰山北缘,乌兰布和沙漠的南缘,东缘距黄河西部河岸约 10 km,如图 1 所示。乌达煤田主要火区为苏海图火区、黄白茨火区和五虎山火区,主要含煤地层为石炭系的太原组和山西组,属于埋藏较浅、缓倾斜煤层群。该煤田发火的主要原因是小煤窑的开挖^[10],特点是火区分布在煤层露头废弃小煤窑处并由露头向深部蔓延。

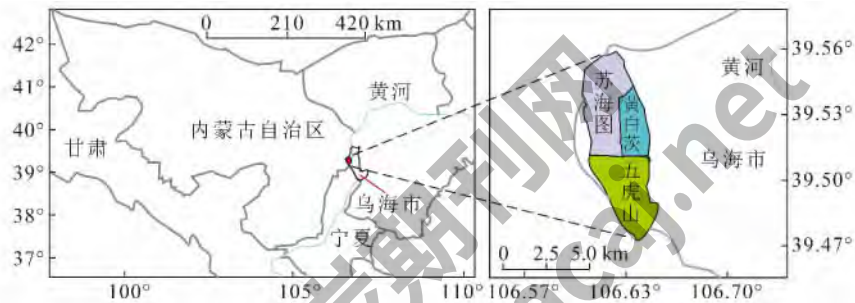


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of study area

2 基于 ASTER 热红外遥感数据地表温度反演

2.1 ASTER 热红外遥感和温度反演方法

Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) 是极地轨道环境遥感卫星 Terra (EOS-AM1) 上载有的 5 种对地观测仪器之一,它提供了可见光-近红外(VNIR)、短波红外(SWIR)和热红外(TIR) 3 个通道的遥感数据,具有较高的空间分辨率和光谱分辨率(表 1)^[11]。笔者采用 2011-01-24 乌达煤田 ASTER L1B 热红外遥感影像数据。

遥感反演地表温度的方法经过多年的发展取得了很大的成果。目前常用的方法包括单通道法、劈窗算法和温度与发射率分离算法^[12]。单窗算法中,大气轮廓线数据在实际运用中较难获得。劈窗算法虽然可以通过两个通道辐射亮温的某种组合来消除大气影响,但其要求下垫面均匀且发射率已知,因此主要适用于海面温度遥感,在陆面温度遥感中的精度远不能达到海面温度遥感中的水平^[13]。笔者选用温度与发射率分离的参考通道法相对简便,具有一定实用

价值^[14-16]。

表 1 ASTER 遥感数据基本性能参数

Table 1 Characteristics of the ASTER sensor systems

子系统	波段	波谱范围/ μm	空间分辨率/m
可见光-近红外(VNIR)	1	0.52~0.60	15
	2	0.63~0.69	
	3N	0.78~0.86	
	3B	0.78~0.86	
短波红外(SWIR)	4	1.60~1.70	30
	5	2.145~2.185	
	6	2.185~2.225	
	7	2.235~2.285	
	8	2.295~2.365	
	9	2.360~2.430	
热红外(TIR)	10	8.125~8.475	90
	11	8.475~8.825	
	12	8.925~9.275	
	13	10.25~10.95	
	14	10.95~11.65	

2.2 参考通道法 ASTER 影像温度反演反演流程如图 2 所示。

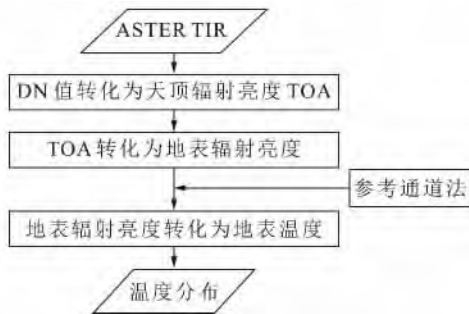


图 2 地温反演流程

Fig. 2 Processes of inversing surface temperature

by ASTER image

(1) DN 值转化为天顶辐射亮度 TOA。

ASTER L1B 数据记录的是 Digital Number (DN 值), 而进行地表温度反演需要的是天顶辐射亮度值。采用辐射定标公式可得到天顶辐射亮度值, 即

$$L = k_{\text{gain}} \text{DN} + \Delta_{\text{offset}} \quad (1)$$

其中, k_{gain} 与 Δ_{offset} 分别为增益与偏差, 可以在 ASTER 数据的头文件中得到。本次使用的 L1B 数据已经经过辐射定标, 即 $k_{\text{gain}} = 1$, $\Delta_{\text{offset}} = 0$, 可以直接使用。

(2) TOA 转化为地表辐射亮度。

这个过程的关键步骤是消除大气的影响, 即大气校正。为得到地表的辐射亮度, 只要知道相关的大气的参数, 就能使用辐射传输模型来估计大气透射率、上行辐射亮度与下行辐射亮度, 然后就能把天顶辐射亮度转化成地表辐射亮度^[17]。笔者使用 ENVI 中的热红外大气校正模块进行校正。

(3) 地表辐射亮度转化为地表温度。

使用参考通道法来进行地表温度反演。参考通道法其基本思想为: 假设在一个确定的通道覆盖的波长范围内, 每个像元都有固定的发射率, 然后通过先验知识, 给出目标物在某一个光谱通道的发射率的假定值, 该通道就称为参考通道。有了这个参考通道发射率的经验值, 根据普朗克公式就可计算出该通道的温度。因为地表地物在 $11 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段的发射率普遍较高, 并且变化相对较小, 因此这里发射率的值取为经验平均值 0.96^[18]。ASTER 数据有 5 个热红外波段, 本次测量的平均温度为 261 K, 由维恩定律可知此温度时的最大波长在 $11.15 \mu\text{m}$ 附近, 因此地表温度反演选用 ASTER 第 14 波段。根据普朗克公式和基尔霍夫定律可反演出地表温度^[19], 采用 Surfer 软件绘制了乌达煤田火区温度分布平面图和频率直方图(图 3, 4)。

3 基于阈值法火区面积圈定

在煤田火区边界提取时, 蒋卫国等^[20]使用 TES

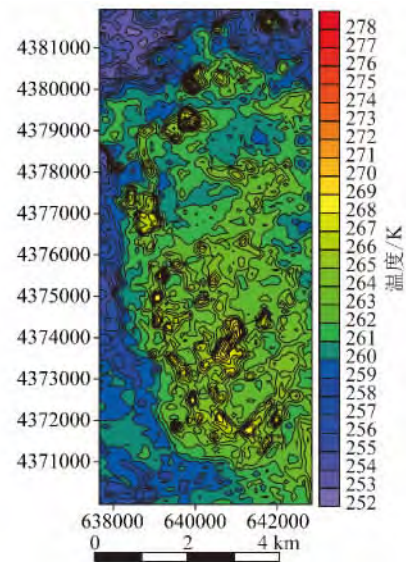


图 3 ASTER 影像反演的温度分布

Fig. 3 Temperature distribution from ASTER image

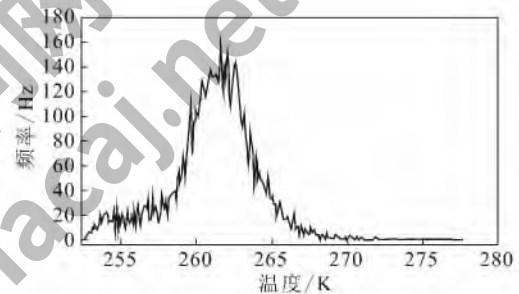


图 4 ASTER 影像温度分布直方图

Fig. 4 Histogram of temperature distribution by ASTER image

-ADE 算法, 通过分析地表温度直方图及煤火区温度, 将地表温度均值与 2 倍标准偏差之和作为煤火区与背景区的阈值分割点。也有人将大于 50°C 作为煤火区与背景区的阈值分割点, 但此绝对温度标准受季节、昼夜等因素影响。笔者采用基本梯度的自适应阈值法进行影像的阈值选取和分割^[21], 以尽量消除人为主观因素和背景温度差异的影响。该方法的基本原理认为从火区内部到外部的边界地区, 温度有较快的衰减, 从而导致较为明显的温度梯度的峰值。在对温度影像进行梯度计算后, 使用一种数学形态学的细化方法得到梯度极值的轮廓线, 对应于这些轮廓线上的平均温度被认为是该幅影像中火区边界的平均温度。使用该平均温度阈值对温度影像进行分割, 可得到温度异常区和背景区^[21]。对反演的温度分布(图 3)进行阈值分割, 得到乌达煤田火区的温度异常分布(图 5)。

根据图 5 提取的火区边界, 通过计算得到 2011 年 1 月乌达煤田的火区面积为 239.6 hm^2 。由于缺乏 2011 年乌达煤田火区面积数据, 笔者选取 2012 年 3

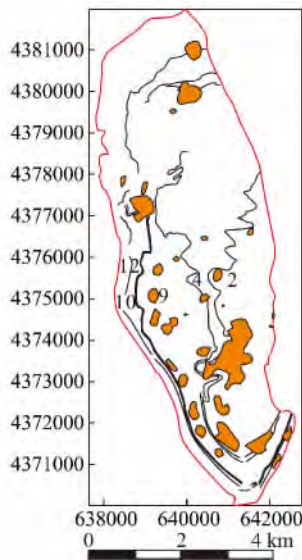


图5 温度异常分布

Fig. 5 Temperature anomaly distribution image

月神华地勘公司航测遥感分公司采用航空高分辨热红外成像光谱仪 TASI-600 热红外数据(地面分辨率 1.5 m)圈定煤火异常,得到的火区范围为 265.5 hm²。其值与本次利用 2011 年 1 月 ASTER 数据反演得到的火区面积 239.6 hm²较为接近,故认为该统计方法得到的火区面积可作为计算碳排放通量的依据。

4 煤田火区碳排放量计算

4.1 煤田火区碳排放量计算模型

煤田自燃区的碳排放量计算是一个比较复杂的问题,要获得准确的碳排放量更是一个巨大的挑战。煤田自燃产生的 CO₂ 是温室气体排放的主要组成部分,但是在国际政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的《国家温室气体清单指南》中,并没有给出煤田自燃过程中碳排放的计算方法^[2]。笔者结合遥感圈定的火区面积,监测火区地表出口处 CO₂ 浓度以及野外地质调查结果,初步建立了基于排放通量估算法的煤田火区的碳排放量计算模型,即

$$C = \sum A_i S_i F_i T \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

式中, C 为碳排放量; A_i 为 i 火区的排放因子; S_i 为 i 火区面积, km²; F_i 为排放通量(单位时间单位面积火区的碳排放量, t/(s · km²); T 为估算时间间隔。

(1) 排放通量 F_i 。

火区内地下的煤层能够燃烧,主要的原因是煤田内由构造裂隙、采动塌陷裂隙和燃烧裂隙构成的裂隙系统提供了燃烧所必须的通风供氧条件,裂隙系统同时也成为煤层燃烧所产生的热量和烟气的排放通道^[23-24]。裂隙系统在不同火区的发育状态受到区域地质控制,具有类似的发育特征,所以乌达煤田火区

的温室气体排放特征也具有相似性。

基于以上特点,通过监测煤火裂隙周边环境数据,在煤田火区裂隙地区周边环境设置监测塔,同步采集风向、风速、温度、气压、CO₂ 浓度等环境数据。对采集的野外环境数据基于传统空气动力学方法^[27]可以估算出煤火裂隙 CO₂ 的排放通量值。由于排放通量与火区温度有一定的联系,空气动力学方法显示火区的温度梯度与碳排放通量成反比,即温度梯度越大,碳排放通量越小,而碳排放通量与地表温度的联系则需要考虑到地表裂隙的发育程度,野外调查发现地表温度越高,裂隙越发育,碳排放通量就越大。笔者取 2012-06-22 在乌达实验区通过煤火裂隙带野外环境数据监测计算得到的 CO₂ 的平均排放通量,其值为 8.5 mg/(s · m²)。

(2) 排放因子 A_i 。

在利用排放通量法计算乌达煤田碳排放时,煤田火区范围内的裂隙起主要的控制因素,燃烧产生的烟气主要通过裂隙排放到大气中,同时小部分烟气通过地层在高温下固碳和渗流扩散方式进入大气。

笔者等曾将煤田火区的裂隙划分为 3 种简单类型:构造裂隙、采动塌陷裂隙和燃烧裂隙,总结出 5 种复合裂隙类型^[28]。乌达煤田裂隙密度背景值为 10~20 条/(100 m²),对Ⅷ号、Ⅸ号、X号火区的裂隙发育特征研究表明,Ⅷ号火区为大矿采空区-小煤窑型火区,Ⅸ号火区为小煤窑型火区,X号火区为大矿采空区型火区,3 个火区的裂隙密度明显高于背景值(表 2)。以火区裂隙密度异常值(裂隙密度均值与背景值之差)与裂隙密度均值的比值反映碳排放因子 A_i ,Ⅷ号、Ⅸ号、X号火区的比值分别为:0.40,0.70,0.57,平均值为 0.56,即取 $A_i = 0.56$ 。

表 2 乌达煤田火区裂隙密度统计

Table 2 Crack density statistical table of the Wuda coalfield fires

火区编号	Ⅷ号	Ⅸ号	X号
裂隙密度/(条 · (100 m ²) ⁻¹)	20~30	40~60	20~50
裂隙密度均值/(条 · (100 m ²) ⁻¹)	25	50	35
裂隙密度异常值/(条 · (100 m ²) ⁻¹)	10	35	20
比值 A_i	0.40	0.70	0.57

4.2 乌达煤田火区碳排放量的计算

利用排放通量估算法估算碳排放量,应基于以下假设:

(1) 火区范围在给定时间段内的变化可以忽略不计。采用遥感反演并初步得到相互验证的 2011-01-24 遥感反演的乌达煤田地面温度观测自燃区面

积 239.6 hm^2 , 即 $S = 239.6 \text{ hm}^2$ 。2012 年 3 月神华地勘航空遥感反演乌达煤田火区面积 265.5 hm^2 , 假设火区范围的变化忽略不计, 取两者的平均值 $S_{\text{ave}} = 252.55 \text{ hm}^2$ 作为乌达煤田火区的面积。

(2) 火区碳排放通量在给定时间段内保持恒定。笔者采用自主研发的煤田火区气体排放环境数据采集装置, 实测了乌达煤田煤火裂隙带 CO_2 排放通量。2012-06-22 实验区煤火裂隙带观测的平均通量值是 $8.5 \text{ mg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$, 即 $F_{\text{ave}} = 8.5 \text{ mg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$, 将其作为 2012 年 1—12 月时间内裂隙带碳排放通量的基准值。

利用碳排放通量计算公式 $C = \sum A_i S_i F_i T (i = 1, 2, \dots, m)$, 计算得到乌达煤田 2012 年的年碳排放量约为 $37.9 \times 10^4 \text{ t}$ 。

5 结论和展望

(1) 所提出的碳排放通量估算法通过热红外遥感技术和野外地质调查手段获取基础数据, 研究结果显示该方法对煤田火区碳排放量的合理估算是可行的。

(2) 采用热红外遥感技术进行地表温度的反演, 可以经济有效地获得火区地表温度, 笔者采用基于梯度的自适应阈值方法, 估算火区异常范围, 2011 年 1 月乌达煤田的火区面积为 239.6 hm^2 。

(3) 利用 2011 年 1 月乌达地区 ASTER 热红外遥感影像圈定了乌达火区面积, 并借助乌达煤田火区野外碳排放通量和相关裂隙测量, 计算得出乌达煤田火区每年以 CO_2 计算的等效温室气体排放量多达 $37.9 \times 10^4 \text{ t}$ 。

本研究是对于煤田自燃碳排放估算的一个尝试。通过遥感影像圈定火区面积、实测排放通量和燃烧裂隙密度三者的结合, 使得碳排放估算得到定量数据的支撑, 从而提高了估算结果的可信度。由于研究经费的限制以及现场作业情况的复杂性, 前期工作未能实现火区温室气体排放的连续观测, 作为方法学研究, 采用某一时点的实测排放通量替代 1 a 的排放量变化; 此外, 基于本文依托项目的研究任务, 碳排放估算仅限于煤层自燃主要排放气体—— CO_2 , 忽略了 CH_4 和 CO 等其他温室气体对火区碳排放的作用。下一步工作将在条件许可情况下, 开展火区排放通量的连续观测, 以获得碳排放量的季节变化特征; 根据火区实测气体成分谱分析, 在碳排放通量计算公式中考虑 CH_4 和 CO 等其他温室气体, 使碳排放量估算更加全面; 开展热红外遥感数据反演煤田火区的地表验证

调查, 优化基于梯度的自适应阈值法。

参考文献:

- [1] Cao K, Zhong X X, Wang D M, et al. Prevention and control of coalfield fire technology: A case study in the Antaibao Open Pit Mine goaf burning area, China [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(5): 657–663.
- [2] 曹代勇, 时孝磊, 樊新杰, 等. 煤田火区环境效应分析 [J]. 中国矿业, 2007, 16(7): 40–42.
Cao Daiyong, Shi Xiaolei, Fan Xinjie, et al. Environmental effect analysis of coalfield fire [J]. China Mining Magazine, 2007, 16(7): 40–42.
- [3] Kuenzer C, Zhang J Z, Tetzlaff A, et al. Uncontrolled coal fires and their environmental impacts: Investigating two arid mining regions in north-central China [J]. Applied Geography, 2007, 27: 42–62.
- [4] 谭永杰. 中国煤田自燃灾害及其防治对策 [J]. 煤田地质与勘探, 2000, 28(6): 8–10.
Tan Yongjie. Coal seam spontaneous combustion hazard and counter-measures in Chinese coalfield [J]. Coal Geology & Exploration, 2000, 28(6): 8–10.
- [5] Cao Daiyong, Dou Xuqian, Yang Guang, et al. Research on calculation method of carbon emission on coalfield fire area [J]. Advances in Biomedical Engineering, 2012, 14: 118–123.
- [6] Mark A Engle, Lawrence F Radke, Edward L Heffern, et al. Gas emissions, minerals, and tars associated with three coal fires, Powder River Basin [J]. Science of the Total Environment, 2012, 420: 146–159.
- [7] Anupma Prakash, Kate Schaefer, William K Witte, et al. A remote sensing and GIS based investigation of a boreal forest coal fire [J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 86(1): 79–86.
- [8] Prasun K Gangopadhyay, Freek van der Meer, Paul van Dijk. Monitoring coal fires using remote sensing [M]. Beijing: Tsinghua University Press and Springer Verlag: 351–361.
- [9] Kuenzer C, Zhang J Z, Sun Y L, et al. Coal fires revisited: The Wuda coal field in the aftermath of extensive coal fire research and accelerating extinguishing activities [J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 102: 75–86.
- [10] 曹代勇, 樊新杰, 时孝磊, 等. 乌达煤田煤层自燃内因分析以及自燃类型划分 [J]. 煤炭学报, 2005, 30(3): 288–292.
Cao Daiyong, Fan Xinjie, Shi Xiaolei, et al. Internal analysis and type division of coal seam spontaneous combustion in Wuda coalfield [J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(3): 288–292.
- [11] 朱黎江, 秦其明, 陈思锦. ASTER 遥感数据解读与应用 [J]. 国土资源遥感, 2003(2): 59–62.
Zhu Lijiang, Qin Qiming, Chen Simian. Interpretation and application of ASTER remote sensing [J]. Land Resource Remote Sensing, 2003(2): 59–62.
- [12] 朱怀松, 刘晓猛, 裴欢. 热红外遥感反演地表温度研究现状 [J]. 干旱气象, 2007, 25(2): 18–20.
Zhu Huaisong, Liu Xiaomeng, Pei Huan. Research status of thermal infrared remote sensing inverting surface temperature [J]. Arid Meteorology, 2007, 25(2): 18–20.

- [3] 王 坤,蒋琦刚,程 彬. 利用 ASTER 数据反演陆面温度的研究进展 [J]. 世界地质,2007,26(3):309-311.
Wang Kun,Jiang Qigang,Cheng Bin. Research progress of surface temperature inversion by ASTER data [J]. Global Geology,2007,26(3):309-311.
- [4] Dash P,Götsche F-M,Olesen F-S,et al. Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: Theory and practice-current trends [J]. International Journal of Remote Sensing,2002,23(13):2563-2594.
- [5] Coll C V,Caselles J M,Galve E,et al. Temperature and emissivity separation from ASTER data for low spectral contrast surfaces [J]. Remote Sensing of Environment,2007,110:162-175.
- [6] Prasun K,Gangopadhyay B Maathuis,Vandijk P. ASTER-derived emissivity and coal-fire related surface temperature anomaly: A case study in Wuda,north China [J]. International Journal of Remote Sensing,2005,26(24):5555-5571.
- [7] 郑 伟,曾志远. 遥感图像大气校正方法综述 [J]. 遥感信息,2004(4):66-69.
Zheng Wei,Zeng Zhiyuan. Review of atmospheric correction methods in remote sensing image [J]. Remote Sensing Information,2004(4):66-69.
- [8] 夏 军,塔西甫拉提·特依拜,张 飞,等. 煤田火区自然地物热红外发射率光谱测量及其特征 [J]. 煤炭学报,2012,37(12):2053-2058.
Xia Jun,Tashpolat,Zhang Fei,et al. Measuring and characteristics of thermal infrared emissivity spectra of natural features in coalfield fires [J]. Journal of China Coal Society,2012,37(12):2053-2058.
- [9] Chatterjee R S. Coal fire mapping from satellite thermal IR data-A case example in Jharia Coalfield,Jharkhand,India [J]. Journal of Photogrammetry & Remote Sensing,2006,60:113-128.
- [10] 蒋卫国,武建军,顾 磊,等. 基于夜间热红外光谱的地下煤火监测方法研究 [J]. 光谱学与光谱分析,2011,31(2):357-361.
Jiang Weiguo,Wu Jianjun,Gu Lei,et al. Study of monitoring underground coal fire based on night thermal infrared spectra [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2011,31(2):357-361.
- [11] Du X,Cao D,Yang G,et al. Estimating typical four-season thermal distribution and self-adaptive gradient based thresholding parameters over coal fire areas in China using ASTER and LDCM TIRS: A case study in the Wuda coalfield,China [A]. ASPRS 2014,Conference Proceeding [C]. 2014.
- [12] Change I P O C. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [M]. Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies,2006.
- [13] 张建民. 中国地下煤火研究与治理 [M]. 北京: 煤炭工业出版社,2008.
- [14] Cao D Y,Fan X J,Guan H Y,et al. Geological models of spontaneous combustion in the Wuda coalfield,Inner Mongolia,China [J]. The Geological Society of America Review in Engineering Geology,2007,XVIII:23-30.
- [15] Yao B H,Wu Y,Liu J S. The effect of the fracture distribution on CO₂ injection into a coal seam [J]. International Journal of Mining Science and Technology,2012,22(1):115-120.
- [16] Zhou H W,Liu J F,Xue D J,et al. Numerical simulation of gas flow process in mining-induced crack network [J]. International Journal of Mining Science and Technology,2012,22(6):793-799.
- [17] 王庚辰. 陆地生态系统温室气体排放(吸收) 测量方法简评 [J]. 气候与环境研究,1997,2(3):251-261.
Wang Gengchen. Comment on greenhouse gas emissions (absorption) measurements in Terrestrial ecosystems [J]. Climatic and Environmental Research,1997,2(3):251-261.
- [18] 曹代勇,樊新杰,吴查查,等. 内蒙古乌达煤田火区相关裂隙研究 [J]. 煤炭学报,2009,34(8):1009-1014.
Cao Daiyong,Fan Xinjie,Wu Chacha,et al. Study on related fracture in Wuda coalfield fires in Inner Mongolia [J]. Journal of China Coal Society,2009,34(8):1009-1014.