

# 新疆煤田火区现状调查研究 ——小尺度区域热辐射信息分析

钟茂华<sup>1</sup>, 符泰然<sup>2</sup>, 胡忠斌<sup>3</sup>

(1. 中国安全生产科学研究院, 北京 100029;

2. 清华大学热能工程系, 热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084;

3. 新疆哈密煤业(集团)公司勘察设计院, 新疆哈密 839003)

**[摘要]** 开展煤田火区现状调查, 研究其对区域气候变化、生态响应系统的影响是评估自然灾害研究中的重要方面。选择新疆部分煤田火区进行了实地考察, 开展了小尺度区域热辐射信息分析, 依据现场实测资料分析, 给出煤田热隐患状态的适度评定。分析结果表明: 小尺度区域热辐射测量方法可用于判别已灭煤田火区的灭火效果分析及新形成火区探测; 对于正在燃烧的煤田火区可判断火区的范围并为灭火提供参考依据。

**[关键词]** 煤田火区; 热辐射信息; 温度; 小尺度; 热像仪

**[中图分类号]** TP79; TD7; TK3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2010)01-0012-06

## 1 前言

由于煤层自燃而引发的煤田火灾已成为我国重大的自然灾害之一, 它造成不可再生资源的巨大损失、国土资源的严重破坏、生态环境的系列污染, 我国政府已把煤田火区自燃灾害的治理列入“中国21世纪议程”。近些年来国内外的专家学者应用遥感技术进行煤田火区的动态监测调查研究, 在理论和应用上取得了显著的成果, 使煤田火区的治理、控制同样取得了相应的进展<sup>[1~9]</sup>。

我国的煤田火区主要分布在华北、西北和东北地区, 尤其以新疆煤田火区数量最多。课题组通过野外的实地考察, 采用科学的研究手段, 对我国新疆煤田火区现状进行调查分析, 探明已灭火区、老火区、新火区的现状分布, 预测未来发展趋势, 定量评估区域煤田火灾对不同尺度的生态环境、气候的外在以及潜在的影响<sup>[10, 11]</sup>, 为区域的气候变化、生态响应系统的研究预测提供新的分析点。作为研究的

系列成果之一, 文章选择新疆具有代表性的淮南煤田进行实地考察, 开展小尺度区域热异常信息分析研究, 探讨煤田火区的分布现状、区域范围, 有别于大尺度航天遥感的粗糙性、近地面航空遥感的不易操作性、地面点测量的数据单一性, 通过对比分析, 给出煤田热隐患状态的适度评定, 为改进煤田火区治理现状提供更进一步的科学支撑, 同时, 更为后续研究气候、生态环境系统提供现状依据。

## 2 新疆煤田火区分布

新疆地处欧亚大陆, 气候干旱, 自然条件独特, 高山与盆地相间的地貌特点对于干旱区气候形成起着重要作用。新疆煤炭资源十分丰富, 预测储量1.8万亿t, 占全国总预测储量的40.6%, 煤田地质构造相对简单, 煤系分布面积广泛。典型的气候、自然条件、地质条件以及人为因素促成了煤田大规模的自燃。大范围的煤田火区不仅仅造成巨大煤炭资源的破坏, 而且自燃放出的各种有害气体, 严重污染

**[收稿日期]** 2008-09-20

**[基金项目]** 国家自然科学基金项目(50606033); 国家“八六三”项目(2007AA04Z178)

**[作者简介]** 钟茂华(1970-), 男, 江西进贤县人, 中国安全生产科学研究院研究员, 研究方向为地下工程火灾安全; E-mail: mhzhong@china-safety.ac.cn

了大气环境、区域生态环境<sup>[12]</sup>。

笔者在新疆淮南煤田进行了实地考察,淮南煤田位于天山北麓,准噶尔含煤区南缘,区内含煤地层为中下侏罗统八道湾组、西山窑组,煤类以弱黏煤、气煤和长焰煤为主。淮南煤田自燃非常严重,有多处煤田火区,西起塔城乌苏,东至昌吉吉木萨尔,沿天山北侧分布。淮南煤田所含的昌吉硫磺沟煤田火区、呼图壁县雀尔沟火区、吉木萨尔水西沟火区、阜康三工河火区等四处是重点考察的煤田火区。

### 3 煤田小尺度区域的热辐射信息分析

依据煤田火区自燃所表现出来的典型物理、化学特征,国内外已发展了若干种探测方法,包括激发电位法、磁法、测氦法、气体测量法、遥感探测法等。通过遥感探测区域热红外异常信息,进而实现煤田火区多尺度区域的动态监测,是一种非常有效的监测法,具有其他方法不可比拟的优势。

对于大尺度区域,采用航天红外遥感探测,例如 NOAA 气象卫星、装有 TM 传感器的陆地卫星,空间分辨率精度 30 ~ 120 m,同时,为实现热异常信息的有效判别,需注意卫星数据资料最佳时相的选择。对于中尺度区域,采用近地面航空红外遥感探测,空间分辨率精度可达到 5 m 左右,同样航测时相的选择也是该探测有效应用的关键因素;对于小尺度区域,航天、航空遥感探测不适用于实现煤田引发的热异常场的有效甄别,宜采用地面红外遥感探测,这比常规的(接触、非接触式)地面点测量更具有可行性。在煤田火区实际考察中,笔者即采用地面红外遥感法对煤田区域进行探测分析。

#### 3.1 热辐射信息分析原理<sup>[13]</sup>

热辐射信息的传输测量涉及热辐射的发射、介质的吸收、光学成像以及光电转换等过程。

德国物理学家 M. Planck 于 1901 年提出 Planck 定律结束了对黑体辐射功率分布的研究:

$$\begin{aligned}
 V^{i,j} &= \gamma \cdot \Phi^{i,j} \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} F(\lambda) \cdot \tau_\lambda \varepsilon_\lambda^{i,j} I_b^{i,j}(\lambda, T_0^{i,j}) d\lambda + \\
 &\quad \gamma \cdot \Phi^{i,j} \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} F(\lambda) \cdot [\tau_\lambda (1 - \alpha_{u\lambda}^{i,j}) I_b^{i,j}(\lambda, T_u^{i,j}) + \tau_\lambda (1 - \alpha_{s\lambda}^{i,j}) I_b^{i,j}(\lambda, T_s^{i,j}) + \varepsilon_{a\lambda}^{i,j} I_b^{i,j}(\lambda, T_a^{i,j})] d\lambda \\
 &= \gamma \cdot \Phi^{i,j} \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} F(\lambda) \cdot \tau_\lambda \varepsilon_\lambda^{i,j} I_b^{i,j}(\lambda, T_0^{i,j}) d\lambda + \Pi(T_u, T_a, T_s, \alpha_{u\lambda}, \alpha_{s\lambda}, \varepsilon_{a\lambda}, \tau_\lambda)
 \end{aligned} \quad (5)$$

热辐射信息分析的主要目的,就是从测量电信号  $V^{i,j}$  中分析反演目标区域的  $(T_0, \varepsilon_\lambda)^{i,j}$  的分布,温度场  $T_0^{i,j}$  与发射率场  $\varepsilon_\lambda^{i,j}$  即反映了区域热信息场的

$$I_b(\lambda, T) = \frac{2hc_0^2}{\lambda^5 [\exp(hc_0/\lambda kT) - 1]} \quad (1)$$

其中:  $k = 1.3805 \times 10^{-23}$  J/K 为 Boltzmann 常数,  $h = 6.6259 \times 10^{-34}$  J·s 为 Planck 常数,  $c_0 = 2.998 \times 10^8$  m/s 为真空中光传播速度。

因此,一般实际物体的自发射辐射强度可以写为:

$$I(\lambda, T, \theta, \varphi, \beta) = \varepsilon(\lambda, T, \theta, \varphi, \beta) I_b(\lambda, T) \quad (2)$$

其中  $\varepsilon(\lambda, T, \theta, \varphi, \beta)$  为物体的光谱定向发射率,描述了实际物体与黑体的辐射强度的差异。

然而,遥感探测器在测量时接收到的热辐射能量,不仅包括物体的自发射辐射,同时也包含环境反射辐射、太阳反射辐射(忽略太阳的直射辐射)以及大气辐射等,写为

$$\begin{aligned}
 E_\lambda^{i,j} &= \varphi^{i,j} \cdot I_\lambda^{i,j} = \varphi^{i,j} \cdot [\tau_\lambda \varepsilon_\lambda^{i,j} I_b^{i,j}(\lambda, T_0^{i,j}) + \\
 &\quad \tau_\lambda (1 - \alpha_{u\lambda}^{i,j}) I_b^{i,j}(\lambda, T_u^{i,j}) + \\
 &\quad \tau_\lambda (1 - \alpha_{s\lambda}^{i,j}) I_b^{i,j}(\lambda, T_s^{i,j}) + \\
 &\quad \varepsilon_{a\lambda}^{i,j} I_b^{i,j}(\lambda, T_a^{i,j})]
 \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $\varphi$  为测量的空间几何因子;  $T_0$  为测量物体表面温度;  $T_u$  为环境温度;  $T_s$  为太阳辐射温度;  $T_a$  为大气温度;  $\tau_\lambda$  为大气的光谱透过率函数;  $\varepsilon_\lambda$  为物体表面的光谱发射率;  $\alpha_{u\lambda}$  为物体表面对环境的光谱吸收率;  $\alpha_{s\lambda}$  为物体表面对太阳辐射的光谱吸收率;  $\varepsilon_{a\lambda}$  为大气的光谱发射率;上标  $(i, j)$  代表着遥感探测器焦平面的测量象素点的分布位置坐标。

通过光学成像、光电转换等各个过程,遥感探测器最终输出的测量电信号为:

$$V^{i,j} = \gamma \cdot \Phi^{i,j} \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} F(\lambda) \cdot I_\lambda^{i,j} d\lambda \quad (4)$$

其中,  $F(\lambda)$  为遥感探测传感器的综合光谱响应函数;  $(\lambda_a, \lambda_b)$  为传感器响应的光谱区间范围;  $\gamma$  为光电转换因子;  $\Phi$  为非光谱变量(包括空间几何因子  $\varphi$ 、传感器面元面积、物体微元面积等非光谱因子)。

整理式(4)得:

分布状况,据此,可以辨识出区域热异常与物性异常。

### 3.2 小尺度区域热红外辐射信息探测装置

煤田火区地表的温度范围在 0 ~ 500 ℃,因此遥感探测传感器的工作光谱波段需选择在中远红外波段,ThermaCAM™ P30 非制冷焦平面红外热像仪为笔者实验选择的实验设备,其主要的性能参数见表 1。

表 1 仪器的性能参数  
Table 1 Technical specifications of ThermaCAM™ P30

FPA (焦平面阵列)	光谱响 应范围/μm	NETD(热灵 敏度)/℃	IFOV (空间分 辨率)	FOV (视场) /最小焦距
320 × 240 像素	7.5 ~ 13	< 0.08 (30 ℃ 时)	1.3 mrad	24° × 18° / 0.3 m

表 2 主要的地理、环境参数

Table 2 Main geographic and environmental parameters

图号	地理坐标 (WGS 1984)	离被测主体的 大致距离/m	环境温度 $T_u$ /℃	湿度 /%	大气温度 $T_a$ /℃	发射率 (7.5 ~ 13) / μm
2 - a	北纬 43°43' 00.07", 东经 87°13'33.23"高度 1 129.949 m	10 ~ 100	25.7	30	13	0.85
2 - b	北纬 43°42'51.77", 东经 87°13'30.51"高度 1 135.610 m	20	24.5	30	13	0.85
3 - a	北纬 43°47' 47.22", 东经 86°19'37.38"高度 1 812.748 m	100	22.8	37	13	0.85
3 - b	北纬 43°47' 56.06", 东经 86°19'41.92"高度 1 850.130 m	5	22.8	37	13	0.85
4 - a	北纬 43°55' 59.28", 东经 88°56'10.66"高度 1 085.801 m	30	23.8	37	13	0.85
4 - b	北纬 43°55'59.57", 东经 88°56'07.62"高度 1 085.534 m	5	23.8	37	13	0.85
5 - a	北纬 44°03' 58.99", 东经 88°05'47.96"高度 996.208 m	200	15.2	37	13	0.85
5 - b	北纬 44°04' 00.21", 东经 88°05' 47.39"高度 978.448 m	2	15.2	37	13	0.85

注:a. “离被测主体的大致距离”为实际目测值,偏差对结果影响不大;b. 大气温度为估算值,其偏差对结果影响不大;c. 不同的地物属性、温度、测量波段的观测角度,物体的发射率数值均不相同,在上述测量区域内,测量成像的主体包括正常岩土、地表烧变岩、植被、大气等,目前无法通过实验获知精确的发射率场,因而,依据技术手册,笔者等选择了对于岩土等地物大致适合的发射率数值(0.85)来表征成像区域的发射率场,这与真实情形是存在偏差的,即便如此,这对于分析热信息场、温度场的异常趋势不会有本质的影响

## 4 测量结果分析讨论

图 1 ~ 图 4 为现场实测结果。昌吉硫磺沟煤田火区已于 2004 年被扑灭,笔者对 4 号火区进行现场调查,图 1(a)为区域局部温度场分布图,这里在 2000 年前为燃烧火区,经过新疆煤田灭火工程处 3 年多的努力,该火区原燃烧区域的火势已基本熄灭,现场实测显示最高温度 33.1 ℃,最低温度低于 0 ℃。岩土受太阳曝晒,吸热升温,所以区域最高温度要略高于环境温度。最低温度反映的则是大气温度,由于 7.5 ~ 13 μm 远红外波段的热像仪不适宜准确测量大气温度,所以此处最低温度所反映的大气温度值仅具有参考价值(以下测量也有类似现象)。分析可知,区域不存在显著的热异常点,已进

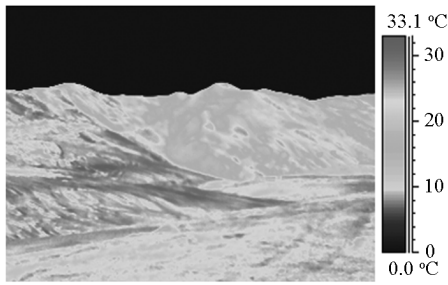
P30 红外热像仪为单通道的辐射遥感探测传感器,内置 4 个黑体辐射源实时对测量结果进行标定修正。对式(5)分析可知,即便当环境参数  $(T_u, T_a, T_s, \alpha_{u\lambda}, \alpha_{s\lambda}, \epsilon_{a\lambda}, \tau_\lambda)$  以及探测空间距离(归结为非光谱变量)已知的情形下,单通道探测无法仅通过  $V^{i,j}$  的测量,实现  $(T_0, \epsilon_\lambda)^{i,j}$  的反演计算,式(5)是非完备的测量方程。通常,假定发射率场  $\epsilon_\lambda^{i,j}$  的近似分布,由此来获知温度场  $T_0^{i,j}$  的大概信息,在对温度精度要求不高的情形下,该种处理方式已能满足测量要求。

### 3.3 测量区域选择

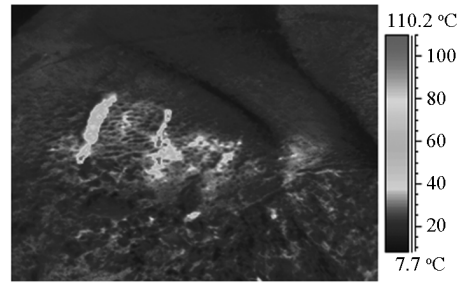
选择昌吉硫磺沟 4 号火区、呼图壁县雀尔沟火区、吉木萨尔水西沟火区、阜康三工河火区作为测量对象。表 2 为各测量区域的主要地理、环境参数。

行的灭火工程的效果是成功的,同时符合煤田火区灭火的标准。然而,在该火区北侧山坡(地理坐标详见表 2),有不足 1 m<sup>2</sup> 的热异常区域,温度场分布见图 1(b),最高温度 44.9 ℃,高于正常值,该区域岩石与植被混杂,近处有微潮热感,初步分析是由于对老火区进行灭火封堵而形成的新热隐患。同时,在该火区范围内有乌鲁木齐县煤矿进行生产,可能破坏原来已形成的火区灭火效果,因此,须对该火区进行监测,防止火区周围产生新的火点。

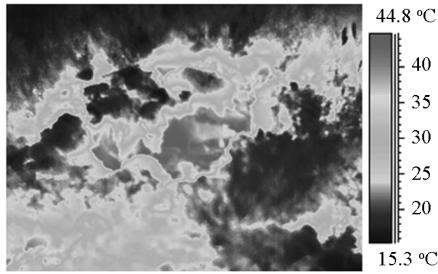
呼图壁县雀尔沟零星地分布着若干热异常区,该火区分布在大西沟煤矿的东西两侧山坡上,大西沟煤矿主要运输巷道位于雀尔沟火区的下部,煤矿的生产以及两侧山坡的自然垮塌诱发煤田火区的形成,图 2(a)所示的两狭长区域带温度达到了 100 ℃



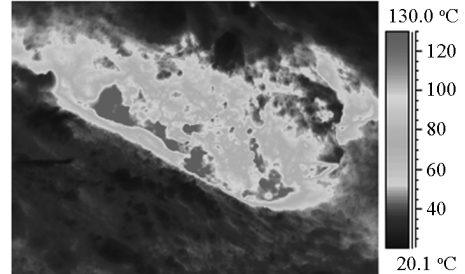
(a) 已灭煤田火区



(a) 雀尔沟西侧火区



(b) 新形成的煤田火区



(b) 雀尔沟东侧火区

图1 昌吉硫磺沟4号火区

Fig. 1 Liuhuanggou coal fire area No. 4 in Changji

图2 呼图壁县雀尔沟火区

Fig. 2 Queergou coal fire area in Hutubi County

左右,面积大约  $1 \sim 2 \text{ m}^2$ ,地表有轻微塌陷,无植物覆盖;图2(b)为近距离观测的另一处热异常区域,面积约  $1 \sim 2 \text{ m}^2$ ,高温达  $130 \text{ }^\circ\text{C}$ ,岩层受高温烘烤变成浅黄色烧变岩,周围土质疏松。雀尔沟火区面积不大,通过常规的大尺度遥感探测不易辨识,但应引起充分的重视。

吉木萨尔水西沟的煤田火区较严重,该火区周边为牧场,周围没有矿井开采活动,主要是自然形成的火区,图3(a)为区域温度场分布,热异常范围较大,面积达几十平方米,远处即可见热烟气,空气中

弥散着硫磺味,但热异常区域呈零星状分布,周边地形为起伏较大的山地,因而,卫星等大尺度遥感探测方式均不易辨识。在实地考察中,在山区山坡一侧,发现若干近  $10 \text{ cm}$  宽的较大地表裂缝,见图3(b),裂缝开口温度高达  $293 \text{ }^\circ\text{C}$ ,开口处有显著的热烟气,裂缝附近有烧变岩分布。该火区有显著塌陷,东西方向长约  $7 \text{ km}$ ,南北宽约  $2 \sim 3 \text{ m}$ ,以烧变岩为主体的局部区域温度在  $50 \sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$  范围内。该区域地质活动较为明显,塌陷区域的较深的地方有  $2 \sim 6 \text{ m}$ 。如图3(c)所示。

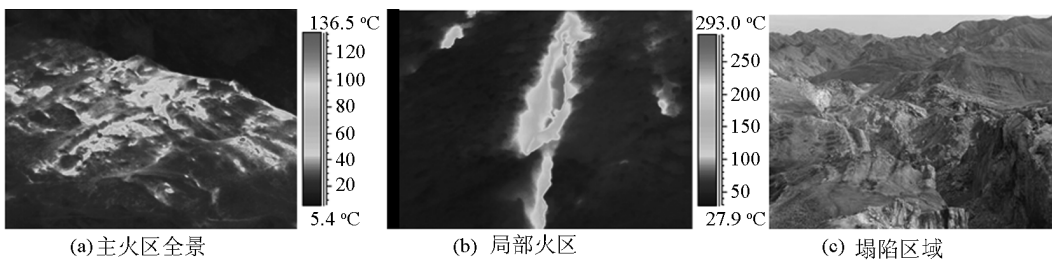
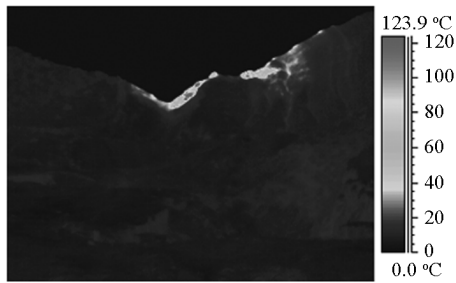


图3 吉木萨尔水西沟火区

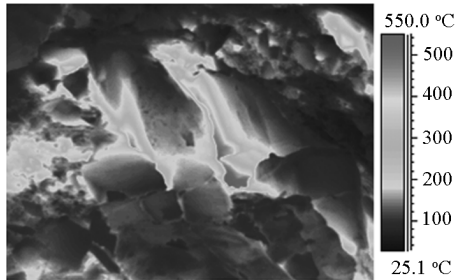
Fig. 3 Shuixigou coal fire area in Jimusar

图4(a)是考察的阜康三工河煤田火区的局部热测量图,山腹地带热异常显著,呈长约  $5 \sim 10 \text{ m}$  的带状分布,最高温度  $123.9 \text{ }^\circ\text{C}$ ;图4(b)为煤田火区

中的另一局部区域的温度场分布图,面积约为  $0.5 \sim 1 \text{ m}^2$ ,裂缝处温度高达  $550 \text{ }^\circ\text{C}$ ,周边烧变岩温度范围在  $100 \sim 400 \text{ }^\circ\text{C}$  之间,附近区域大面积塌陷,空气



(a) 火区远景



(b) 局部火区

图4 阜康三工河火区

Fig.4 Sangonghe coal fire area in Fukang



图5 三工河煤田火区附近形成的新塌陷区

Fig.5 New collapse areas in Sangonghe coalfield

中硫磺味刺鼻,且有强烈的灼热感。该火区周围有煤矿开采活动,同时在火区与生产矿井之间已出现若干个新的塌陷区,如图5所示。这些新塌陷区将很快形成新的煤田火区,目前火区发展较为迅速,该火区应是近期规划治理的重点。

## 5 结语

选择新疆具有代表性的淮南煤田(昌吉硫磺沟4号火区、呼图壁县雀尔沟火区、吉木萨尔水西沟火区、阜康三工河火区)进行实地考察,开展了小尺度区域热辐射信息分析研究。得出如下结论:

1) 小尺度区域热辐射信息分析方法可对已灭煤田火区的灭火效果进行分析,查找原火区周围新的热隐患。

2) 对未灭煤田火区,小尺度区域热辐射信息分析方法可判断火区燃烧严重程度和火区范围,为灭火工作提供参考。

3) 该分析方法不仅为改进煤田火区治理现状提供更进一步的科学支撑,而且也后续研究气候、生态环境系统提供现状依据。

## 参考文献

- [1] 康高峰. TM 图像在新疆奇台北山煤田火区动态监测中的应用[J]. 国土资源遥感,1996,(2):57-62
- [2] Genderen, Van J L, Cassells C J S, et al. The Synergistic use of remote Sensing data for the detection of Underground Coal fires[J]. International archives of Photogrammetry and Remote Sensing,1996,31(7):9-19
- [3] 管海晏,冯亨特伦,谭永杰. 中国北方煤田自燃环境调查与研究[M]. 北京:煤炭工业出版社,1998
- [4] 张建民,宁书年,曹燕. 中国北方地区煤层自燃环境影响及其治理对策研究[J]. 中国减灾,1998,8(1):55-66
- [5] P rakash A, Fielding E J, Gens R. Data fusion for investigating land subsidence and coal fire hazards in a coal mining area[J]. International Journal of Remote Sensing,2001,22(6):921-932
- [6] Zhang X, Genderen J V, Guan H Y, et al. Spatial analysis of thermal anomalies from airborne multispectral data[J]. International Journal of Remote Sensing,2003,24(19):3727-3742
- [7] 张建民,管海晏, Rosema A,等. 煤田火区遥感四层空间探测方法[J]. 国土资源遥感,2004,62(4):50-62
- [8] Stefan Voigta, Anke Tetzlaffa, Jianzhong Zhanga, et al. Integrating satellite remote sensing techniques for detection and analysis of uncontrolled coal seam fires in North China[J]. International Journal of Coal Geology,2004,59:121-136
- [9] 陈云浩,李京,杨波,等. 基于遥感和GIS的煤田火灾监测研究——以宁夏汝箕沟煤田为例[J]. 中国矿业大学学报,2005,34(2):226-230
- [10] 叶佰生,丁永建,康尔泗,等. 近40年来新疆地区冰雪径流对气候变暖的响应[J]. 中国科学D辑,1999,29(增刊1):40-46
- [11] 陈曦,罗格平,夏军,等. 新疆天山北坡气候变化的生态响应研究[J]. 中国科学D辑,2004,34(12):1166-1175
- [12] 新疆煤田灭火工程处. 新疆阜康小龙口、小黄山火区灭火工程竣工报告[R]. 2001
- [13] 程晓舫,符泰然,范学良. 谱色测温原理[J]. 中国科学G辑,2004,34(6):639-647

# Small-scale area survey and analyses of Xinjiang's coal field fire in China

Zhong Maohua<sup>1</sup>, Fu Tairan<sup>2</sup>, Hu Zhongbin<sup>3</sup>

(1. China Academy of Safety Science and Technology, State Administration of Work Safety, Beijing 100029, China; 2. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Xinjiang Hami Coal Industry (Group) Co., Ltd, Hami, Xinjiang 839003, China)

[**Abstract**] In this paper, Xinjiang's coal field is selected as the investigation area. Through a series of field surveys in Xinjiang, we made the small-scale area analysis of coal field fire using the ground remote sensing technique, and presented the reasonable evaluation of thermal anomaly conditions of Xinjiang's coal field arising from coal self-ignition fires. The results show that the method of small-scale area analysis is available for examining the extinguished actuality of coal fires and detecting fire spots. Therefore, for the selected fire-extinguished coal field in Xinjiang, the fire extinguishing effect was effectively analyzed by the means, and the new hidden thermal dangers were sought and diagnosed. For the coal field where the fire has not been extinguished, the utilization of this means approximately identified the severity and range of the fire area, and provided the quantitative and ground reference for extinguish engineering.

[**Key words**] coal field fire; thermal anomaly; temperature; small-scale; remote sensing