

应用 DTM 改善煤层自燃的热红外探测*

万余庆 张祥民

(中国煤田地质总局航测遥感局 西安 710054)

摘 要 根据遥感物理基础, 提出了应用 DTM 计算出地表的太阳辐射强度, 并以此为依据校正 TM 第 6 波段的象元值, 消除地形的影响, 突出由煤层自燃引起的地表热异常, 为灭火工程及火区动态监测提供信息和指导。文中选择了新疆淮南煤田的硫磺沟火区为试验区, 展示了研究的成果。

关键词 煤层自燃, DTM, 太阳辐射, 动态监测, 灭火工程。

1 火区简介

中国北方的煤层自燃导致了如下一系列的严重问题。(1) 损失了大量的煤炭资源。每年损失煤炭约 2 亿吨, 占全国现有总开采量的 20%。(2) 煤炭自燃释放出大量的 CO_2 和其它有害气体, 如: SO_2 、 H_2S 、 S 、 CO , 污染了空气, 恶化了环境, 损害了人类的健康。 CO_2 增强了全球的温室效应。(3) 破坏了地表的形态, 一些矿井被迫停产。(4) 煤层自燃放出大量的热能, 改变了地物的热红外辐射特征。在热红外扫描图象上, 燃烧区在影象亮度上存在着显著的正异常。它与某些地区太阳辐射引起的热异常很难区分, 给影象解译带来了困难。

为了准确地解译出煤层自燃的范围, 为灭火工程提供信息, 并对自燃作动态监测, 我们选择了位于新疆淮南煤田的硫磺沟火区进行重点研究, 试图利用 DTM 扣除太阳辐射对 Landsat TM 热红外波段影象的影响, 以便更准确地探测煤层自燃。

2 基本方法

利用 DTM 帮助探测煤层自燃的方法分 3 个步骤:(1) 根据 DTM 计算出各点的太阳辐射强度。(2) 把辐射强度转换成地表热辐射强度图。(3) 利用热辐射强度图校正 TM 第六波段的图象, 突出自燃引起的热异常。

2.1 地表热辐射

TM 第六波段的象元值取决于地表热辐射强度。它受表面温度, 地物发射率及地表到传感器之间的大气吸收率和发射率的影响, 在标准黑体的表面, 某一温度 T 所对应的光谱辐射强度 $L_{\lambda T}^{BB}$ ($\text{wm}^{-2}\text{sr}\mu\text{m}^{-1}$) 可用普朗克方程计算:

$$L_{\lambda T}^{BB} = C_1 / \{ \lambda^5 \cdot (e^{C_2 / \lambda T} - 1) \} \quad (1)$$

* 本文是国家科委和欧共体联合研究项目成果的一部分。在研究过程中曾得了荷兰 ITC 学院博士研究生 Craig Cassell's 的帮助。特此致谢。
收稿日期: 1995 年 12 月 26 日; 收到修改稿日期: 1996 年 3 月 15 日

这里 $C_1 = 2\pi hc^2 = 3.7415 \times 10^{-16} (\text{wm}^2 \mu\text{m}^{-1})$, $C_2 = hc/k = 1.43879 \times 10^4 (\mu\text{mk})$ 。

全球陆地表面的平均反射率约为 0.3 (H. Mannstein), 试验区煤系地层的平均反射率小于 0.2, 所有的地质体都被认为是灰体, 它们的辐射强度 $L_{\lambda T}^{GB}$ 用下式表示:

$$L_{\lambda T}^{GB} = \varepsilon_{\lambda T} \cdot L_{\lambda T}^{BB} \quad (2)$$

式中 $\varepsilon_{\lambda T}$ 为地物的发射率。

陆地卫星传感器接受到的地物光谱辐射强度 L_{λ} 由下列几个部分组成

$$L_{\lambda} = \tau_{\lambda} \cdot L_{\lambda T}^{GB} + \tau_{\lambda} \cdot \gamma_{\lambda} \cdot L_{\lambda d} + L_{\lambda u} \quad (3)$$

式中 $L_{\lambda d}$ 为大气向下的辐射强度; γ_{λ} 为地表的反射率; $L_{\lambda u}$ 为大气向上的辐射强度; τ_{λ} 为大气的穿透性, 即透过率。

在某一地区可认为 $\tau_{\lambda} \cdot \gamma_{\lambda} \cdot L_{\lambda d} + L_{\lambda u} = C_s$ 为一常量, 因而公式 (3) 变成:

$$L_{\lambda} = \tau_{\lambda} \cdot L_{\lambda T}^{GB} + C_s \quad (4)$$

TM 第六波段反映的热能来自两个方面, 即太阳能和地下热能。假设在相同的大气条件下, 相同的热吸收性、热惯量, 相同的湿度、风向、风力, 相同的地面坡度和坡向, TM 图象各象元对应的地面温度应该相同, 这里我们忽略区域性地热的影响。对于地面某一点而言, 若太阳辐射使之温度升高为 T_1 , 煤层自燃时, 其温度变成 T_2 , 即 T_2 是由太阳辐射和自燃共同作用的结果。显然 $T_2 > T_1$, 利用公式 (4) 可以计算出煤层自燃引起的热辐射异常值:

$$\Delta L_{\lambda} = \tau_{\lambda} \cdot L_{\lambda T_2}^{GB} - \tau_{\lambda} \cdot L_{\lambda T_1}^{GB} \quad (5)$$

为能计算出热辐射异常值, 下一步是计算出地面各点的 $L_{\lambda T}^{GB}$ 。受地形起伏的影响, 同一时刻, 有的点正对太阳, 获得最多的太阳辐射能, 有的点斜对阳光, 获得的太阳辐射能较少, 因而地面各点在同一时刻的温度必然存在差异。根据 DTM 可以估计地面各点获得的太阳辐射能的相对大小, 并把其转换成 $L_{\lambda T}^{GB}$ 。

2.2 利用 DTM 估计地面各点所获得的太阳辐射能

J. V. Dave 和 杨凯指出^[1,2] 太阳对地面某点的辐照度是该点所处的地形位置 (坡度和坡向), 太阳方位角和天顶角的函数。假设太阳正对地面的辐照度为 L_{iS} , 光线与地面面元法线的夹角为 θ , 那么在平坦的地面上太阳辐照度为 L'_{iS} 即:

$$L'_{iS} = L_{iS} \cdot \cos\theta \quad (6)$$

当 $\theta = 90^\circ$ 时, 地表得不到太阳辐射。即 $L'_{iS} = 0$ 。根据 DTM, 公式 (6) 中的 $\cos\theta$ 可用下式计算:

$$\cos\theta = \sin\theta_z \cdot \sin p \cdot \cos(\alpha_s - \alpha_n) + \cos\theta_z \cdot \cos p \quad (7)$$

θ_z 是太阳的天顶角, 如果太阳的高度角为 α , 那么天顶角为:

$$\theta_z = 90^\circ - \alpha \quad (8)$$

α_s 为太阳的方位角, α 和 α_n 将在下文讨论; p 为地面面元坡度角, α_n 为地面面元法线方位角, p 和 α_n 均可用 DTM 计算出来。

2.3 计算太阳的方位角 α 和高度角 α

高度角和方位角都是时间 h (单位: 小时) 的函数^[3]。设 φ 为地面某点的纬度 (北半球), Δ 为经度 (从格林威治子午线向东计算), D 为第几天 (从元月一日起算)。

$$\alpha = \sin^{-1} \{ \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos H \} \tag{9}$$

$$\alpha_s = \cos^{-1} \{ (\sin \delta - \sin \varphi \cdot \sin \alpha) / \cos \varphi \cdot \cos \alpha \} \tag{10}$$

这里 δ 为太阳赤纬, 可用下式近似表达:

$$\delta = \sin^{-1} \{ 0.3987 \sin [0.986 \times (D - 80)] \} \tag{11}$$

H 为太阳时角, 其计算公式为:

$$H = 15h - 180 + \Delta + E \tag{12}$$

式中 E 为太阳实际位置与虚拟位置 (即太阳运行过程中的平均位置) 的时间角差异值, 可用下式计算:

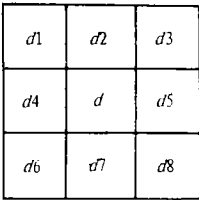
$$E = 2.47 \sin \{ 1.97 (D - 80) - 1.92 \sin \{ 0.986 (D - 3) \} \} \tag{13}$$

上述各式中除了 E 之外, 所有的角度单位都为度, (10) 式中的 α_s 在取反三角函数运算时, 如果出现负值, 应注意 Δ 和 H 保持相同的符号。

2.4 计算地表各点的坡度角和倾向角

地面某点的坡度角 P 和倾向角 α_n 取决于与该点相联的 8 个面元的高程值 (图 1)。

为与 TM 图象相互匹配, 各面元的尺寸应等于 TM 图象相应的象元分辨率。图 1 中心面元 d 的倾向角 α_n 和坡度角 P 可用下式计算:



$$\text{tg}P = \sqrt{\left(\frac{N_x}{N_z}\right)^2 + \left(\frac{N_y}{N_z}\right)^2} \tag{14}$$

$$\text{tg}\alpha_n = (N_x / N_z) / (N_y / N_z) \tag{15}$$

图 1 地面某一面元 d 及其相邻的面元

Fig.1 Pixel and its surround pixels

$$N_x / N_z = \{ [d_1 + d_4 + d_6] - [d_3 + d_5 + d_8] \} / 2R \tag{16}$$

$$N_y / N_z = \{ [d_6 + d_7 + d_8] - [d_1 + d_2 + d_3] \} / 2R \tag{17}$$

式中 $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7, d_8$ 为面元 d 的 8 个相邻面元的高程值。 R 为分辨率。

2.5 根据模拟的太阳辐射能量图, 从 TM 第六波段上提取热异常

实测表明, 煤系地层的反射率为 10—20%, 可近似地认为各点对太阳能是均匀的吸收, 用下式可以近似地模拟出地面吸收的太阳辐射能量图:

$$L_{i,T_1}^{GB} = K_1 \cdot L'_{i,S} \tag{18}$$

K_1 为系数, 它受全波段反射率, 地物热惯量、湿度、风向、风力等因素的影响, 在一个地区内要想同时获得各点的上述诸个参数是不可能的, 因而这里把 K_1 作为一个常数; 由于 TM 第六波段的亮度范围在 0—255 之间, 这里 K_1 取值 255。显然, 模拟图象上必然含有一些误差, 尽管如此, 模拟图象仍反映了地面各点的太阳辐射能量的

相对大小,并与TM第6波段的影象有着很高正相关性。上述各个因素的影响将在下文讨论。

把TM第6波段看成 $L_{\lambda T_6}^{GB}$,然后再用公式(5)即可得到一幅地表热异常图,在该图象上,象元越亮,地表正热异常越高,并且很可能为自燃点。

3 试验结果

3.1 试验区介绍

淮南煤田的硫磺沟火区火情严重,被选为试验区。其东径为 $43^\circ 40' - 43^\circ 48'$,北纬为 $87^\circ 06' - 87^\circ 14'$,高差为800m。图版I图2为地质解译图,煤层自燃分布于克拉扎背斜两翼,北翼近于直立,南翼倾角较缓,煤层自燃南翼盛于北翼,图例F1为煤层已燃烧的地区,F2为活火区。图版I图3为试验区的DTM,影象越亮,地表越高。区内TM图象成象于1994年9月14日,成象时的太阳高度角为 $42^\circ 30'$,方位角为 $127^\circ 25'$ 。

3.2 利用DTM模拟太阳辐射能量图象

利用高程数据和公式(7)计算出每点的 $\cos\theta$,若 $\cos\theta$ 为负值,说明该点位于阴影中, $L'_{\lambda S}$ 的值被赋为零,公式(6)演化为:

$$L'_{\lambda S} = \begin{cases} L_{\lambda S} \cdot \cos\theta & \text{当 } \cos\theta > 0 \\ 0 & \text{当 } \cos\theta \leq 0 \end{cases} \quad (19)$$

用公式(18),即得到太阳辐射能量图象。该图象的亮度范围为0—255,充满整个显示器亮度的动态范围,各象元点的差异更为明显。图版I图4为地面各点的 $L'_{\lambda T_1}$ 组成的图象,即各点太阳辐射能量模拟图象。

3.3 结果

图版I图5为该区TM第6波段的图象,已经过几何精校正。区内分布了大量的活火区。把图版I图5与图4相减,得到一幅地表热异常分布图(图版I图6)。在图版I图6上,活火区较亮,太阳辐射的影响得到抑制。图版I图7为该区航空热红外扫描图象,成像于1992年7月30日,该图象上的亮区均为活火区,亮度值越大,温度越高。与图版I图7相比,图版I图6上大部分亮区的轮廓与图版I图7的火区轮廓相似,这正是我们预期的结果。

4 讨论

与图版I图7相比,图版I图6仍有一些亮度值较高的非火区象元点,这与理想结果有些偏差,下列因素是导致偏差的原因。

4.1 太阳照射时间的影响

根据DTM计算,这些非火亮区坡向都指向东方(类似图8中的A点),从日出开始(9月14日的日出时间为5:50),即受太阳照射。坡向向西的面元(如图8中B点)

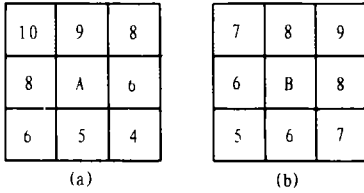


图 8 两个面元 A 和 B 及其相邻面元的高程值

Fig.8 Two pixels and their surrounding pixels' elevation

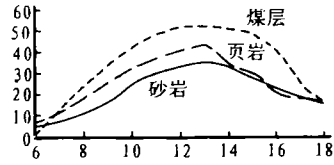


图 9 煤系地层 6:00—18:00 温度变化图

Fig.9 Temperature curves (6:00—18:00) of the main seams in the coal field

上午 8:30 才有阳光照射。到扫描成像时 (10:02 地方时) A 点已受阳光照射了 4 小时, B 点不足 2 小时。地表温度与太阳辐照时间的关系 (图 9)。图 9 为 6:00 到 18:00 的 3 种煤系地层主要岩性的温度变化图。图 9 表明,日出到卫星扫描这段时间内,是地表太阳辐射能积累期,地表温度上升很快。太阳照射时间越长,地表温度越高^[4]。若模拟太阳辐射能量图象时,考虑日照时间的影响,则结果会更加精确。这也是进一步改善效果的方法之一。

4.2 DTM 的精度

试验证明若 DTM 精度不高,模拟图象上必定存在误差。在绘制地形图和数字化时,必然有误差,这也降低了 DTM 的精度。所以最好是采用自动化立体测图所得的 DTM 数据。

4.3 风的影响

S. M. Sighs 的研究表明^[5],平面上水体在波长 $11 \mu\text{m}$ — $12 \mu\text{m}$ 之间的发射率受到风的影响。H. Maunnstein 的研究证实^[6],山风吹动时,把高温区的热量带到山谷中的低温区。参考成像时的风向及风力资料,结合 DTM 将能更准确地区分地表热异常的成因。如何精确地量化和利用这两个参数也是我们正在研究的内容。

4.4 地物热惯量和湿度的影响

地物热惯量决定了它的热力学特征。地表水、孔隙水、裂隙水在蒸发时要吸收大量的热量,实测表明,上午 9:00 以后相同的太阳辐射条件下,潮湿地表比干旱地表的温度低。

4.5 地表地层岩性的影响

在 2.5 节中假设了煤系地层上各点对太阳辐射是均匀吸收,忽略了岩性的影响。煤系地层中的各类岩石,因矿物成分和色调的差异,温度也有较大的差异。相同条件下,色调越深,温度越高。图版 I 图 5 右上角非煤火高温异常点的岩性为深红色砂岩。为能排除上述各类因素的干扰,改善利用 DTM 探测煤层自燃的效果。目前,我们正在利用多元回归分析和神经网络分析等方法分析各类实测数据,以期获得更理想的系数。

5 结 论

用 DTM 模拟太阳辐射强度,进而从 TM 第 6 波段图象上探测出煤层自燃区,与夜航热红外扫描图象相比,试验结果是成功的。一些火区的轮廓被突出。如果在模拟过程

中考虑太阳辐射时间、地层、气象资料和地物的热惯量及地表湿度等因素的影响, 在结果图象上更能有效地突出煤层自燃信息。

参 考 文 献

- [1] J. V. Dave, Ralph Bernstein. Effect of terrain orientation and solar position on satellite-level luminance observation. *Remote Sensing of Environment*. 1982, 12, 331—348.
- [2] 杨 凯等. 遥感图象处理原理与方法. 测绘出版社, 1988.
- [3] W. G. Rees. *Physical principles of remote sensing*. Cambridge University Press. ISBN0 52135213 4. 1990.
- [4] 管海晏. 煤炭遥感应用. *Acta Geologica Sinica*. 1989, 2(3): 254—269.
- [5] S. M. Singh. Effect of surface wind speed and sensor view zenith angle dependence of emissivity on SST retrieval from thermal infrared data: ATSR. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(13): 2615—2625.
- [6] H. Mannstein. Land surface energy budget. *NATO ASI Series*, 124, 367—391.

作 者 简 介

万余庆, 男, 1963年6月生, 1985年毕业于山东矿院地质系, 现从事灾害地质与环境遥感研究。先后承担过国家攻关项目和国际合作项目, 并赴美国和荷兰从事研究和学习, 在国际、国内发表论文5篇。

Using DTM to Improve the Accuracy of Detecting Coal Fires with Thermal Infrared Images

Wan Yuqing Zhang Xiangmin

(*Aerophotogrammetry and Remote Sensing of China Coal Xi'an 710054*)

Abstract Coal fire is a commonly existed disaster in coal fields of northern China, it burnt huge amount of coal resource. Firefighting is a long-term and tough job. Thermal infrared images of TM band 6 show us temperature information, which depends on solar radiance and ground heat. Based on remote sensing principle, this paper focuses on using DTM to improve the accuracy of detecting coal fires with thermal infrared images. On the resultant image thermal anomaly caused by coal fire is much clear, this is helpful for firefighting and dynamic monitoring. Junnan coal field was selected as a test area. Several pictures were displayed for the result.

Key words Coal spontaneous combustion, DTM, Solar radiation, Dynamic monitoring, Fire-extinguishing

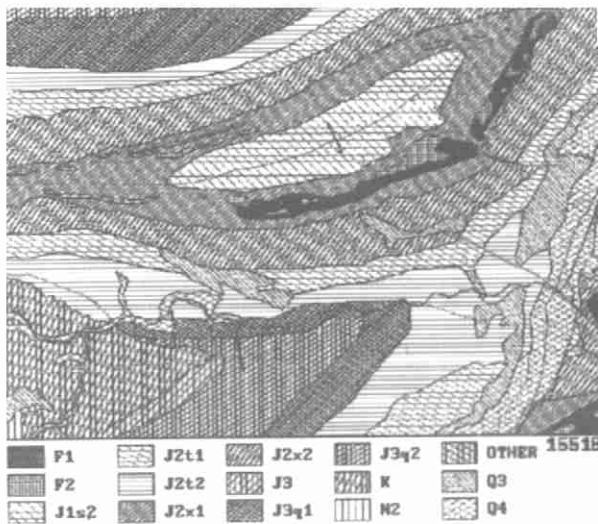


图2 试验区的地质解译图

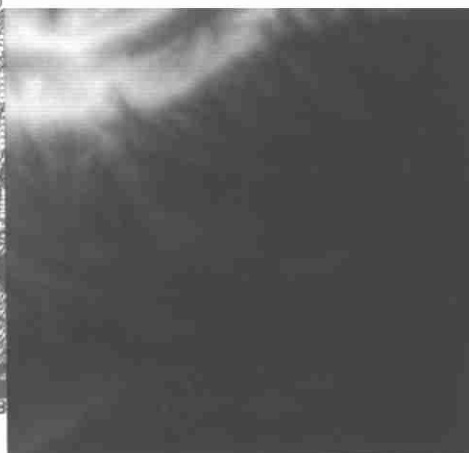


图3 试验区 DTM

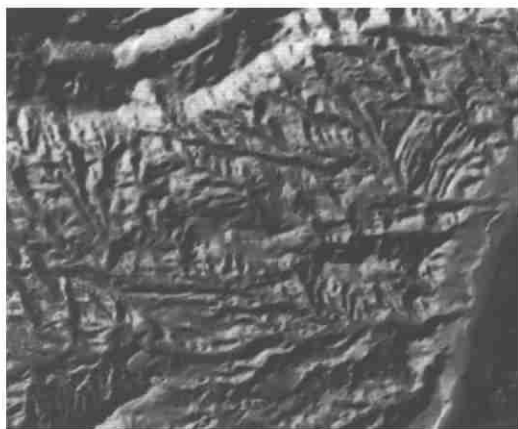


图4 模拟太阳辐射强度图

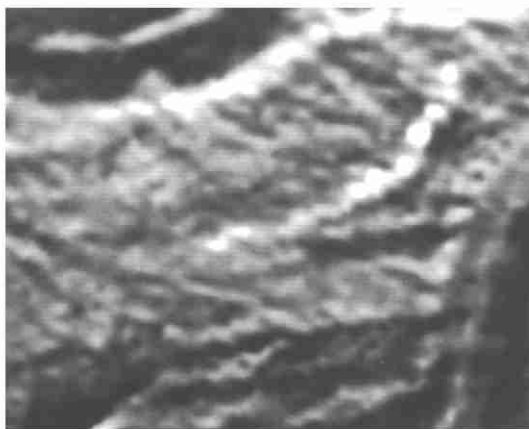


图5 TM 第6波段图象

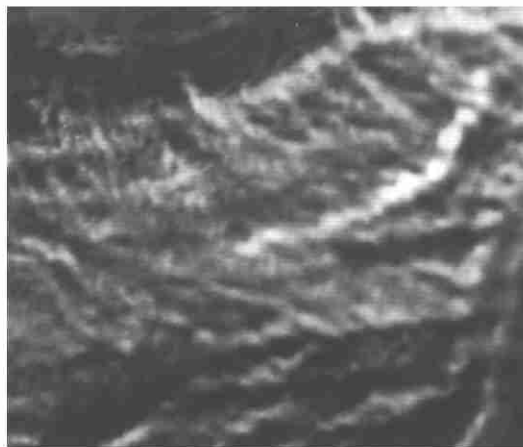


图6 火区被突出的图象

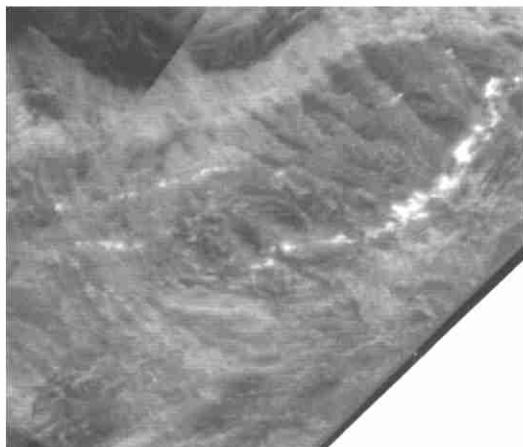


图7 夜航热红外扫描图象