

# 岩石的热模型分析\*

崔承禹 肖 青 支毅乔 张晋开

(中国科学院遥感应用研究所 北京 100101)

**摘 要** 在几种岩石热辐射理论模型分析的基础上,考虑到岩石的红外光谱辐射特性和岩石的热性质——热惯量,建立岩石的热传输模型,并将实测数据代入,对岩石表面的一个日照周期内的变化做出计算,绘制出不同热惯量的几种岩石在日周期内表面温度变化曲线。由曲线看出,岩石热惯量大,其昼夜辐射温度变化小;热惯量小的岩石其昼夜辐射温差大。改变岩石的反照率、辐射系数和地面径向热流而得到岩石表面温度日变化曲线,可看出这3个因素只是改变了温度的量值,不像热惯量那样改变曲线的形状。

**关键词** 热模型,岩石,热传输,热惯量

## 1 引 言

热红外遥感信息用于识别地球表面不同岩性岩石,对它的机理研究是至关重要的。影响岩石表面红外辐射的因素主要有两个方面:一是岩石与大气半空间的相互作用,一是岩石内部的热传输。我们首先分析了国外已有的岩石热辐射的几种理论模型,为了解释热红外成像的有关物理性质和过程, Watson (1971) 提出了采用近表面传导的热传输数学模型<sup>[1]</sup>, Watson 模型是在 Jaeger (1953) 的理论上发展的,这种方法既可用于分析地球表面和行星的热辐射,又可解释航空热红外成像资料,这项技术已扩展到检查地表覆盖和地衣覆盖的影响。第2种模型是用以解决非线性传输问题,即有限差分方法<sup>[2]</sup>,其必须选择空间与时间增量,以保证达到收敛性。在边界条件下确定线性辐射通量项,然后用更精确的拉普拉斯变换解来检验数字结果。这种比较对地质体周日温度范围是适宜的,通常用于绘制热惯量变化图。第3种是 A. M. Tonelli 的岩石热传输模型<sup>[3]</sup>。这种模型实质是傅里叶方程。热红外波段观测到地表面呈现出的热场分布,它取决于地下复杂物质及其热传导率。该理论试图应用傅里叶方程来做岩石能量传输分析。

以上所列国外的主要3种理论模型是我们的分析基础。这些模型的正确性和实用性,尚需通过一

些实际测量参数和设定的边界条件,反复检验。由于本项研究旨在研究岩石热辐射的昼夜变化,包括岩石的热惯量、辐射温度等热传输问题,而有限差分法必须选空间与时间增量,对研究地质体的周期性的辐射温度变化,绘制岩石热惯量周日变化图是非常适宜的。下面依据我们的测量数据应用差分法做几种岩石的热模型分析。

## 2 岩石的热模型

采用红外遥感数据对岩石的岩性进行分析和识别,主要依据岩石的红外光谱辐射特性和岩石热性质,即表征岩石物理性质的一个参数——热惯量。现以应用分析为目的,从实例中抽象出岩石的热传输模型,并将各因素对温度的影响进行具体分析。

处于半无限空间中的岩体(图1),其温度  $T$  的

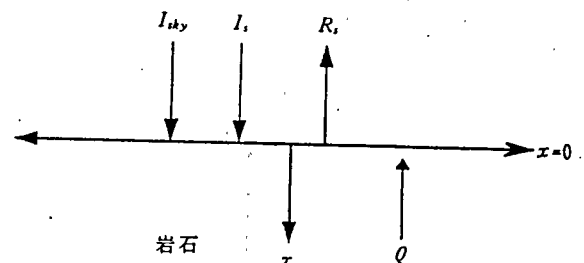


图1 岩石表面热平衡示意图

Fig.1 Sketch map of thermal balance on rock surface

\* 国家自然科学基金重大项目(编号: 49493404)之4-3专题; 国家自然科学基金项目: 岩石、矿物的红外辐射特性研究(批准号: 6877022).  
收稿日期: 1997-09-02; 收到修改稿日期: 1997-10-16

变化可以用一维的热传导方程来描述, 这里将文献 [2] 中的扩散方程改写成:

$$k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中  $\rho$  为岩石密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $C$  为比热容 ( $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ),  $k$  为热传导率 ( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ),  $x$  为岩石内距表面深度 ( $\text{m}$ ),  $t$  为时间 ( $\text{s}$ )。由于岩体表面温度受日照周期的影响, 所以温度变化也是周期性的。在岩石表面的热平衡状态下, 边界条件:

$$-k \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = -R_s + I + Q \quad (2)$$

其中,  $R_s$  是岩石表面辐射的能量;  $I$  是吸收的长波和短波辐射;  $Q$  是地表径向地热热流通量 (Geothermal Heat Flux)。图 1 示出,  $Q$  是来自地下流向岩石表面地热热流值 (当地下岩石地热梯度高于近地表时), 其热流通量单位为 HFU,  $1\text{HFU} = 4.1868 \times 10^{-6}\text{J}$ 。地热热流通量  $Q$  是研究岩石的热传输时必不可少的, 因此在 (2) 式的右侧已经加上一项  $Q$ , 以保持方程的平衡。由于岩石的质地较均匀, 并且假设其表面是干燥的, 就不考虑其它方面的热交换过程。

公式 (2) 中  $R_s = \varepsilon\sigma T^4$ , 单位为  $\text{W}/\text{m}$ ,  $\varepsilon$  为辐射系数 (emissivity),  $\sigma$  为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, 为  $5.67 \times 10^{-12}\text{W}/(\text{cm}^2\text{K}^4)$ ,  $T$  为岩石表面绝对温度 ( $\text{K}$ )。 (2) 式中包含吸收太阳的短波辐射  $I_s$  和天空中的长波辐射  $I_{\text{sky}}$ ,  $I_{\text{sky}}$  可近似表示为  $\varepsilon\sigma T_{\text{sky}}^4$ ,  $T_{\text{sky}}$  是等效空气温度, 为了求解方便, 可以对 (2) 式右边进行线性化, 即

$$\begin{aligned} -R_s + I &= -\varepsilon\sigma T^4 + \varepsilon\sigma T_{\text{sky}}^4 + I_s \\ &= -4\varepsilon\sigma T_{\text{sky}}^3(T - T_{\text{sky}}) + I_s \end{aligned} \quad (3)$$

当  $(T - T_{\text{sky}})/T_{\text{sky}} \leq 1$  时, (3) 式成立, 而这一条件基本上是满足的。

为求解方便, 下面的公式 (4), (5), (6) 引自文献 [2], 但具体参数值按我们实测时的时间、地点和岩石表面坡度等的相关值代入。

吸收太阳短波辐射  $I_s$  是地面反照率  $A$ , 太阳倾角  $\delta$ , 纬度  $\lambda$  以及地面坡度角的函数。可表示为:

$$I_s = (1 - A)S_0 Lm(z) \cos z' \quad (4)$$

式中  $S_0$  是太阳常数;  $L$  是云层影响因子;  $m(z)$  表征大气透过率, 是天顶角  $z$  的函数;  $z'$  是由于地面坡度形成的区域天顶角, 其中

$$m(z) = 1 - 0.2\sqrt{\sec z} \quad (5)$$

$z$  是天顶角, 表示为:

$$\cos z = \cos \lambda \cos \delta \cos \omega t + \sin \lambda \sin \delta$$

$\omega$  是日变化周期角频率,  $t$  是地方太阳时,  $\cos z'$  表示地

面坡度  $d$  与方位角  $\varphi$  的影响, 由下式给出:

$$\begin{aligned} \cos z' &= \cos d \cos z - \sin d (\sin \varphi \cos \delta \sin \omega t \\ &\quad - \cos \varphi \sin \delta \cos \lambda - \sin \lambda \sin \delta \cos \omega t) \end{aligned}$$

$d$  是地面与水平面的角度,  $\varphi$  是正北与坡度角顺时针方向形成角度。

由于受地方时的影响, 在此引入一个新的变量  $H(t)$ :

$$H(t) = \begin{cases} m(z) \cos z' & (t_R < t < t_s) \\ 0 & (t_s < t < t_R + \tau) \end{cases} \quad (6)$$

式中  $t_R$  为太阳升起的时间,  $t_s$  为太阳落下的时间, 为研究方便, 在本模型中取  $t_R$  为 6:00,  $t_s$  为 18:00,  $\tau$  为日照周期。国外采用中午 12:00 至次日 12:00 时分<sup>[1]</sup>。我们认为日落后的红外辐射能量的大小主要取决于岩石在白天接收到的辐照度。那么从太阳升起至次日的太阳升起作为一个日照周期是比较合适的。

这样,  $I_s$  可以重新整理为:

$$I_s = (1 - A)S_0 LH(t) \quad (7)$$

由此, (2) 式可表示为

$$\begin{aligned} -k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{0,t} &= -4\varepsilon\sigma T_{\text{sky}}^3(T - T_{\text{sky}}) \\ &\quad + (1 - A)S_0 LH(t) + Q \end{aligned} \quad (8)$$

式 (8) 可以作为 (1) 式热传导方程的在  $x = 0$  时的初始边界条件, 这是一个典型抛物线型方程, 可以用差分方程来求解。虽然差分方程比较费时一些, 但通过编程, 由计算机自动处理, 在合理选择空间和时间步长的情况下, 效果还是很满意的。

前面提到该问题应属于半无限空间的微分问题求解, 但从我们以前的实际测温中发现, 在 80cm 以下, 岩石内部的温度已不受表面影响, 基本上趋于一个较稳定的值。所以在求解过程, 我们把实际岩体可以视为一个长 1m 的线性体, 地下的一端温度稳定 (在一定季节内是满足这一条件的)。对于热由下向上传导的热流作为一个密度均一的岩体来说, 时间是极其缓慢的, 在此问题中, 只考虑地表径向热流  $Q$ 。

对于这个问题, 这里采用克兰克-尼克森法, 步长  $\Delta x$  取 5cm, 则  $n = 20$ 。设  $T = u$ , 并使 (1) 式变成一般偏微分方程, 以便于差分求解。这里将 (1) 式改写成:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\rho C}{k} \frac{\partial u}{\partial t}$$

上式可以表示为:

$$\frac{1}{2} \left[ \frac{u_{i+1}^j - 2u_i^j + u_{i-1}^j}{(\Delta x)^2} + \frac{u_{i+1}^{j+1} - 2u_i^{j+1} + u_{i-1}^{j+1}}{(\Delta x)^2} \right] = \frac{\rho C}{k} \left( \frac{u_i^{j+1} - u_i^j}{\Delta t} \right)$$

式中  $i$  代表位置,  $j$  代表时间。

整理克兰克-尼克森公式:

$$-r(u_{i-1}^{j+1} + (2 + 2r)u_i^{j+1} - ru_{i+1}^{j+1}) = ru_{i-1}^j + (2 - 2r)u_i^j + ru_{i+1}^j \quad (9)$$

这里  $r$  是比例因子, 对于差分方程, 由  $r$  决定是否收敛, 一般取  $r \leq 1$ , 则

$$r = \frac{k\Delta t}{\rho C(\Delta x)^2}, \quad \Delta t = \frac{r\rho C(\Delta x)^2}{k}, \quad \Delta x = \sqrt{\frac{k\Delta t}{r\rho C}}$$

在 (8) 式中, 令

$$\begin{aligned} a &= 4\varepsilon\sigma T_{\text{sky}}^3 \\ b &= -k \\ c &= 4\varepsilon\sigma T_{\text{sky}}^3 + (1 - A)S_0LH_0 + Q \\ T &= u \end{aligned}$$

则方程的上边界 (岩石表面)

$$au + b \cdot \frac{\partial u}{\partial x} = c \quad (10)$$

可整理为:

$$\begin{aligned} &\left( \frac{2.0}{r} + 2.0 - \frac{2a\Delta x}{b} \right) u_1^{j+1} - 2u_2^{j+1} \\ &= \left( \frac{2.0}{r} - 2.0 + \frac{2a\Delta x}{b} \right) u_1^j + 2u_2^j - \frac{4c\Delta x}{b} \end{aligned} \quad (11)$$

式 (11) 中:

$$\frac{\Delta x}{b} = \frac{\sqrt{\frac{k\Delta t}{r\rho C}}}{k} = \sqrt{\frac{\Delta t}{r}} \times \sqrt{\frac{1}{k\rho C}}$$

又由于热惯量<sup>[4]</sup>  $P = \sqrt{k\rho C}$

$$\text{则 } \frac{\Delta x}{b} = \frac{\sqrt{\Delta t/r}}{P} \quad (12)$$

代入 (11) 式得:

$$\begin{aligned} &\left( \frac{2.0}{r} + 2.0 - \frac{2a\sqrt{\Delta t}}{P\sqrt{r}} \right) u_1^{j+1} - 2u_2^{j+1} \\ &= \left( \frac{2.0}{r} - 2.0 + \frac{2a\sqrt{\Delta t}}{P\sqrt{r}} \right) u_1^j + 2u_2^j - \frac{4c\sqrt{\Delta t}}{P\sqrt{r}} \end{aligned} \quad (13)$$

对于下边界 (岩石内部), 由于温度设为恒定, 可写成:

$$u = T_0 \quad (14)$$

式中  $T_0$  随岩石的不同而略有差异。

因式 (9), (13), (14) 组成一个完整的差分方程, 通过编程, 可以得到岩石的热惯量  $P$ , 辐射系数  $\varepsilon$ , 反照率  $A$  等, 对岩石表面温度在一个日照周期内变化的影响。计算中所取的一些常量如下:

- 热惯量  $P = 2161 - 4025 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$
- 反照率  $A = 0.3$
- 辐射系数  $\varepsilon = 1.0$
- 纬度  $\lambda = 30^\circ$       太阳倾角  $\delta = 0^\circ$
- 空气温度  $T_{\text{sky}} = 260 \text{ K}$       地面倾角:  $d = 0$
- 云量覆盖 0 级 (视为  $L = 1$ , 晴天, 无云层覆盖的影响)
- 日出时间  $t_r = 6:00$
- 日落时间  $t_s = 18:00$

图 2—图 5 为用热模型计算绘制的典型曲线。

### 3 几种岩石的热模型曲线分析

这里选取 5 种岩石为例, 将实测数据计算的热惯量 ( $P$ ) 值<sup>[5]</sup> 做热功当量换算, 并按  $P$  值大小顺序排列为白云岩 ( $P = 4025$ )、鲕状灰岩 ( $P = 3266$ )、玄武岩 ( $P = 2992$ )、安山岩 ( $P = 2598$ )、闪长岩 ( $P = 2162$ ), 这里热惯量  $P$  的单位为  $\text{W} / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$ 。按前述热模型公式, 绘制出图 2 的 5 种

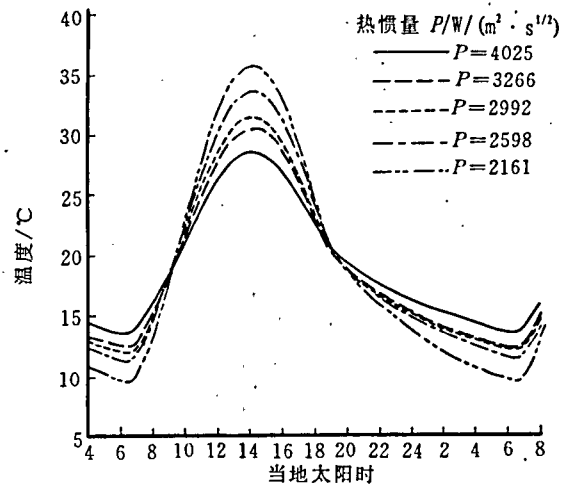


图 2 不同热惯量岩石周日温度变化曲线

Fig.2 The diurnal temperature variation of rocks with different thermal inertia

不同热惯量的岩石在日周期中岩石表面的昼夜温度变化曲线。由曲线形状可明显看出, 岩石热惯量的影响在一天之中变化很大, 热惯量大的物

质,昼夜温度变化较小,例如白云岩温度变化范围为 15℃;而热惯量时小的物质,表面温度受日照周期的影响大,即昼夜温差大,闪长岩温度变化范围为 27℃。从曲线中还可发现,虽然各种岩石的热惯量不一样,但在日出和日落后约 1.5 小时左右出现交点,在交叉点上各种岩石的表面温度基本上是一样的,交叉点的温度接近昼夜的平均温度。同时曲线又特别明显的示出,在中午 12:00 至 16:00 时,是不同热惯量岩石的温差变化最大的时分,14:00 点时温度最高,闪长岩比白云岩温度高出 8℃,易于区分和识别岩性,但给识别岩性带来干扰,给温度计算带来困难;在午夜 0:00 至晨 6:00 时分也是岩石温差变化稍大的一段,这两种岩石相差 4℃,并且呈梯度较小的直线状的缓慢温度降低,对岩性识别和温度计算更为有利。

图 3 示出白云岩在不同反照率情况下周日温度变化曲线。该图说明了同种物质在同样条件下,反照率( $A$ )低,其辐射温度(能量)高,符合基尔霍夫定律。

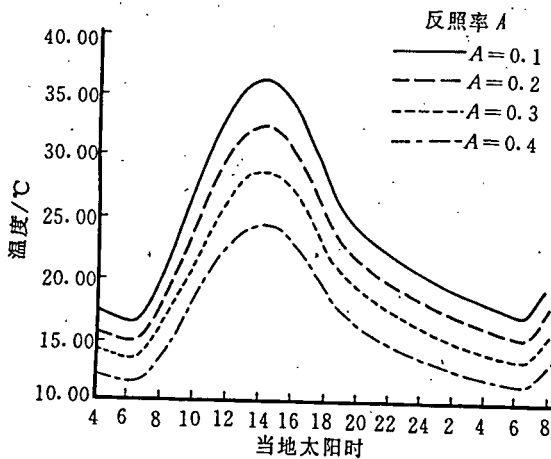


图3 不同反照率岩石周日温度变化曲线

Fig.3 The diurnal temperature variation of rocks with different albedo

图 4 示出的是岩石选用不同辐射系数( $\epsilon$ )的周日温度变化曲线。可以看出,辐射系数( $\epsilon$ )大者,其昼夜的辐射温度均小,反者则大。而且在夜间变化幅度大,呈线性,利用  $\epsilon$  易于区分岩性。模型中对于  $A$ ,  $\epsilon$  的参数值选取是根据地表和岩石可能出现参数值范围设定的,以便于同一条件的讨论分析。

从图 3 和图 4 的周日温度变化曲线可看出,  $A$  和  $\epsilon$  只是改变了温度的量,没有像热惯量那样改

变曲线的形状。

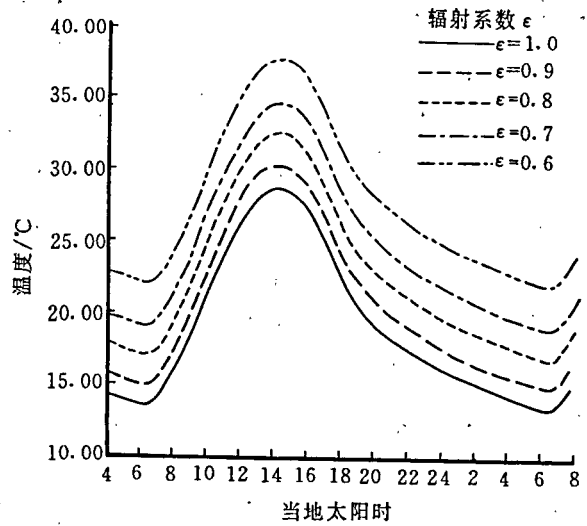


图4 不同辐射系数岩石周日温度变化曲线

Fig.4 The diurnal temperature variation of rocks with different emissivities

红外热成像可显示地表空间温度的变化,利用热红外遥感进行填图是地热普查勘探的一种探测技术,在世界的一些地区已有不少成功的监测实例。在进行地质填图时,注意对由于地质、水文、地形变化的噪声效应而产生的低电平地热异常的探测。由于这种地质特征或地形的自然变化会很容易被淹没在太阳照射时对地体的加热和地壳(岩石)内部的地热热流值为  $mJ$  量级<sup>[6-9]</sup>。在作各种地质地形因素影响的定量估算时,需要对这一影响因素进行校正。在一般情况下求取地热热流值( $Q$ )时,可用热模型(8)式来求取。在边界条件  $x=0$  时,  $Q$  主要依赖于地面的热惯量、反照率和坡度的变化。为了计算  $Q$ ,需远距离测量平均周日温度、反照率和岩石辐射系数。平均周日温度的计算可以用周日循环内的几次测量地面温度来产生。需要的次数可用比较几次测量的平均温度作为周日平均温度( $T_{dc}$ ),并将这种温度差转换成等效热通量来计算<sup>[1]</sup>。图 5 为白云岩岩石表面不同热流值的周日温度变化曲线。可以看出,变化曲线同样呈近似正弦曲线式的周期变化,18:00 至 7:00(按本项设定的当地太阳时间)为低缓的线性下降;早 8:00 至 18:00 时温度变化梯度大,变化幅度大约为  $0.168mJ$  为温差  $3^{\circ}C$ 。这个结果可供研究地热热流值和干扰因素分析参考。

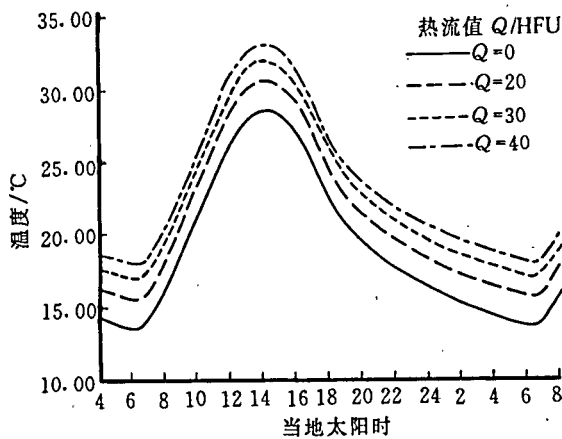


图5 不同热流值岩石周日温度变化曲线

Fig.5 The diurnal temperature variation of rocks with different heat flux values

## 4 结 语

通过上述的讨论分析看出,岩石的热惯量模型对不同热惯量值的岩石识别、区分岩性,以及在夜间(凌晨)和中午的最佳探测时间及效果提出了初步看法。我们测试过 23 种岩石的热惯量值<sup>[5]</sup>。它们的模型曲线形状大体相同。

## 参 考 文 献

- 1 Watson, Kenneth, *et al.* Application of Thermal Modeling in the Geologic Interpretation of IR Images. *Proceedings of the*

- 7th International Symposium on Remote Sensing of Environment, 1971, 3: 2017—2041.
- 2 Watson, K. Geological Application of Thermal Infrared Images. *Proceeding of the IEEE*, 1975, 63: 128—137.
- 3 A. M. Tonelli. The Study of Landslides Forecasting by Means of Thermal Transitory of Rocks, *Proceeding of the 10th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 1975, 1017—1021.
- 4 Kahle, Anne B., *et al.* Thermal Inertia Imaging: A New Geological Mapping Tool. *Geophysical Research Letters*, 1976, 3: 26—28.
- 5 崔承禹. 岩石的热惯量研究. *环境遥感*, 1994, 9(3).
- 6 M.P. Hochstein, D. J. Dickinson. Infrared remote sensing of thermal ground in the Taupo region, New Zealand, U. N. Symp. Development and Utilization of Geothermal Resources, 1970, 2: 420—423.
- 7 D. E. White, L. D. Miller. Calibration of geothermal infrared anomalies of low intensity in terms of heat flow. *EOS (Amer. Geophys. Union Trans.)*, 1969, 50: 348.
- 8 H. Hase, Surface heat flow studies for remote sensing of geothermal resources. *Proc. 7th Int. Symp. Remote Sensing of Environment*, 1971, 1: 237—245.
- 9 G. Palmason, J. D. Friedman, *et al.* Aerial infrared surveys of Reykjanes and Torfajokull thermal areas, Iceland, with a section on the cost of exploration surveys. in U. N. Symp. Development and Utilization of Geothermal Resources, 1970, 2: 339—412.

## 作 者 简 介

崔承禹,男,1937年11月生。1961年毕业于长春地质学院地球物理勘探系,研究员。现从事红外遥感、遥感地质的基础与应用研究,在国内外学术刊物上发表论文 52 篇。

## Analysis of Rock Thermal Model

Cui Chengyu Xiao Qing Zhi Yiqiao Zhang Jinkai

(Institute of Remote Sensing Applications, Academia Sinica, Beijing 100101)

**Abstract** The rock heat-transfer model which involves the rock infrared spectral behavior and thermal properties (thermal inertia) has been derived based on the analysis of several rock thermal models. Much lab or field data were used to compute the diurnal temperature variation on the rock surface. From the diurnal temperature variation curves of rocks with different thermal inertia, it can be shown that the diurnal temperature variation of the rock with high thermal inertia value is much larger than that of the rock with low thermal inertia value. When the albedo, emmissivity and vertical heat flux of the rock were changed respectively, only the magnitude of the rock diurnal temperature changed and the whole trend of temperature variation did not change greatly. This was very different from the case that the rock thermal inertia changed.

**Key words** Thermal model, Rock, Heat transfer, Thermal inertia