

风场下自然地表红外辐射统计特性

饶瑞中 宋正方

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽, 合肥, 230031)

考虑风场存在时热对流的作用, 并根据自然地表的热平衡方程分析了自然地表红外辐射的统计特性, 分析中采用一级近似, 结果表明, 风场的存在将使地表温度的概率分布产生明显改变, 峰值及平均温度趋近地表附近空气的稳定温度, 并导致地表热辐射图像对比度的显著降低, 文中还提出了热对流效应的饱和现象。

关键词: 热图像, 红外辐射, 地表, 风场。

1 引言

自然地表的红外热辐射图像对于地面目标探测的背景识别以及地质学的应用具有重要的价值。近来对地表辐射的统计特性、时间特性的研究现已由理论模型计算发展到初步的定性试验。R. K. Scoggins^[1]处理了裸露的地表、植被以及森林等密集型植被的热模型。N. Ben-Yosef等^[2]的研究针对干燥无风的沙漠类地表, 仅考虑太阳辐射、地表热传导和热辐射之间的能量平衡。D'Agostino^[3]提出处理此类问题须全面考虑与地表热系统相联系的各种因素。当不考虑因对流产生的热交换时, 地表温度只涉及和其相联系的地下温度。

实际自然环境中, 风场经常存在, 而由此导致的热对流是地表热量损失的一个重要因素。因此我们将建立起风场存在时的热平衡方程, 并由此出发分析地表的热辐射特性。结果表明: 当考虑热对流作用时, 地表温度不仅与地下温度相联系, 而且还和地表附近空气的稳定温度有关。

2 风场存在时的热平衡方程

分析自然地表的辐射都从地表的热平衡入手, 一方面地表吸收太阳辐射能量和大气辐射能量, 另一方面地表又通过传导、对流、辐射以及相变等方式释放出能量。不同的地表, 其产生主要作用的能量转移方式也不同。为使问题简化并不失一般性, 我们假定:

- (1) 大气辐射能量远小于太阳辐射能量和地表辐射能量, 略去不计。
- (2) 地面及其附近的空气相当干燥, 无相变能量的转移。
- (3) 地表无植被或植被稀少, 无化学能量的转移。

排除以上三种形式的能量转移, 得到地表的热平衡方程

$$C'_v \frac{dT'}{dt} = Q_{sun} - Q_{ca} - Q_{co} - Q_r, \quad (1)$$

式(1)中 C'_v 为地表的定容热容量, T' 为地表温度, Q_{sun} 、 Q_{ca} 、 Q_{co} 和 Q_r 分别为地表在单位时间内吸收的太阳辐射能量和通过传导、对流、辐射三种形式释放的能量。

对于某种特定的自然地表, 红外热图像的产生在于地表各单元热辐射能量的差异, 而各单元的热辐射取决于该单元的温度与发射特性。假定一地表单元的热系统如图 1 所示。地表对太阳辐射的吸收系数为 $\alpha(x, y)$, 地表的发射系数为 $\varepsilon(x, y)$, 地表单元面积为 A , 厚度为 d 。整个单元内温度为 T' , 忽略各单元间的热传导, 它们以热传导的方式向温度为 T_0 的地下转移, 热传导系数为 $k(x, y)$ 。到达地面的太阳辐射能量为 $E(t)$ 。风场的方向取为 x 方向, 地面上方有限高度处空气的稳定温度为 T_s , 风速为 u_s , 则式(1)中各量分别为

$$C'_v = C_v \rho V = C_v(x, y) \rho(x, y) A d, \quad (2)$$

$$Q_{ca} = k(x, y) [T'(x, y) - T_0] A / d, \quad (3)$$

$$Q_r = \varepsilon(x, y) \sigma T'^4(x, y) A, \quad (5)$$

$$Q_{sun} = \alpha(x, y) A E(t).$$

式(2)~(5)中, $C_v(x, y)$ 为地表的定容比热, $\rho(x, y)$ 为密度, σ 为 Stefan-Boltzmann 常数。

$$Q_{co} = \bar{h} A [T'(x, y) - T_s]. \quad (6)$$

式(6)中 \bar{h} 为平均热传递系数, \bar{h} 与风速 u_s 的关系为

$$\bar{h} = 2 \times 0.332 k_A \sqrt[3]{P_r} \sqrt{u_s / \nu} L \propto \sqrt{u_s}; \quad (7)$$

k_A 为空气的热传导系数, P_r 为 Prandtl 数, ν 为空气的粘滞系数, L 为地表单元在风向上的长度。

将式(2)~(6)代入式(1)得

$$c_v \rho \frac{dT'}{dt} = \alpha E(t) - k(x, y) (T' - T_0) / d$$

$$- \bar{h} (T' - T_s) - \varepsilon(x, y) \sigma T'^4, \quad (8)$$

式(8)中出现了 T' 的四次方项, 不易求解。令 $T' = T_0 + T$, 则地表单元的热辐射能可表示为

$$\begin{aligned} E_r &= \varepsilon \sigma T'^4 = \varepsilon \sigma (T_0 + T)^4 \\ &= \varepsilon \sigma T_0^4 + 4 \varepsilon \sigma T_0^3 T + 6 \varepsilon \sigma T_0^2 T^2 + 4 \varepsilon \sigma T_0 T^3 + \varepsilon \sigma T^4, \end{aligned} \quad (9)$$

为了对式(9)右端作正确的取舍, 以 $T_0 = 300$ K, $T = 20$ K 为例估算其零级近似相对误差为 22.8%, 一级近似为 2.2%, 由此可见令

$$E_r = \varepsilon \sigma T_0^4 + 4 \varepsilon \sigma T_0^3 T \quad (10)$$

是合理的。地表红外热图像 E_r 的变化正比于 T 的变化, 因而 T 的统计特性就是 E_r 的统计特性。

文献[5]在热平衡方程中以 $\varepsilon \sigma T_0^4$ 代替 $\varepsilon \sigma T'^4$ (即零级近似), 其前提为 $4 \varepsilon \sigma T_0^3 T \ll k T / d$, 这固然是一个可取的假设, 但注意到前面所作的误差估计。就要考虑式(10)中的第二项, 即作一级近似而不作零级近似。

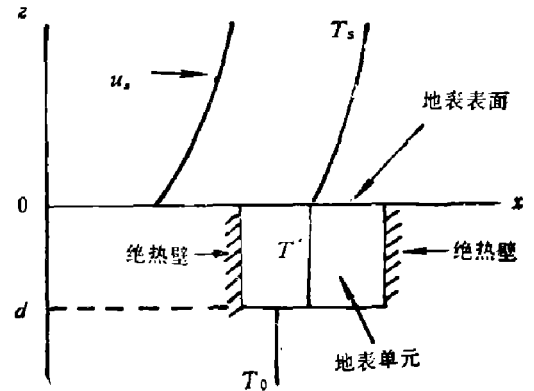


图 1 地表单元热系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the thermal system of a terrain element

3 辐射能的统计分布

将式(10)代入式(8)可得:

$$C_{\rho} \frac{dT(x, y, t)}{dt} = \alpha(x, y) E(t) - [k(x, y)/d + \bar{h}] T(x, y, t) + 4s(x, y) \sigma T_0^3 T(x, y, t) - \bar{h}(T_0 - T_s) - s(x, y) \sigma T_0^4 \quad (11)$$

略去 $s(x, y)$ 的变化和 T 对时间的导数项^[5], 并认为风速 u_s 在足够长的时间内稳定, 则

$$T(x, y, t) = \frac{\alpha(x, y) E(t) - [\bar{h}(T_0 - T_s) + s \sigma T_0^4]}{k(x, y)/d + \bar{h} + 4s \sigma T_0^3} \quad (12)$$

令 $k/d = k'$, $\eta = \alpha / \langle \alpha \rangle$, $\xi = k' / \langle k' \rangle$, $C = s \sigma T_0^4 / \langle k' \rangle$, $K = E_{\max} \langle \alpha \rangle / \langle k' \rangle$, $E(t) = E_{\max} f(t)$, $\bar{h} / \langle k' \rangle = H$, 则

$$T = \frac{\eta K f - [H(T_0 - T_s) + C]}{\xi + H + 4C/T_0} \quad (13)$$

设 $\alpha(x, y)$ 、 $k'(x, y)$ 服从正态分布并互相独立^[5], 其均值与方差分别为 $\langle \alpha \rangle$, σ_α , $\langle k' \rangle$, $\sigma_{k'}$, 则 η 、 ξ 亦服从正态分布, 其均值、方差为: $\langle \eta \rangle = \langle \xi \rangle = 1$, $\sigma_\eta = \sigma_\alpha$, $\sigma_\xi = \sigma_{k'}$. 此时令 $Kf - [H(T_0 - T_s) + C] = A$, $H + 4C/T_0 + 1 = B$, $\sigma_1 = \sigma_\alpha K f$, $\sigma_2 = \sigma_{k'}$, 则 T 的概率密度为

$$P(T) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2} \frac{e^{-c}}{a} [1 + \sqrt{\pi} x e^{x^2} \text{erf}(x)]; \quad (14)$$

其中 $x = \frac{b}{\sqrt{a}}$, $a = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 T^2}{2\sigma_1^2\sigma_2^2}$, $b = \frac{B\sigma_1^2 + A\sigma_2^2 T}{2\sigma_1^2\sigma_2^2}$, $c = \frac{B^2\sigma_1^2 + A^2\sigma_2^2}{2\sigma_1^2\sigma_2^2}$.

文献[5]分析了 T 的概率密度分布曲线的非对称性、偏斜度、峰态以及 T 的均值、方差与 $E(t)$ 的变化关系. 本文着重分析由于风场的存在 T 的概率密度分布的一些特征. 由于 $u_s \propto \bar{h}^2$, 而 $\bar{h} \propto H$, 因此 H 是表征风速的一个参量. 我们通过分析 T 的概率密度分布及其特征量与 H 的关系来了解热对流的作用效果.

图 2 绘出了 H 值分别为 0、3、6 时 T 的概率密度分布曲线. $H=0$ 对应于无热量对流,

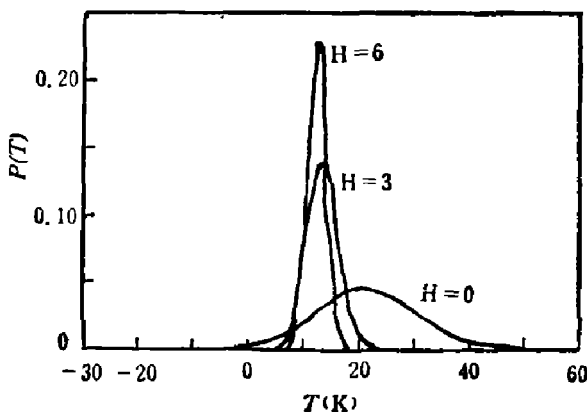


图 2 三种 H 值时 T 的概率密度分布
($K=60$, $C=30$, $\sigma_\alpha=0.2$, $\sigma_{k'}=0.2$,
 $T_0=300\text{ K}$, $T_s=310\text{ K}$)

Fig. 2 The probability density distribution of T for three values of H

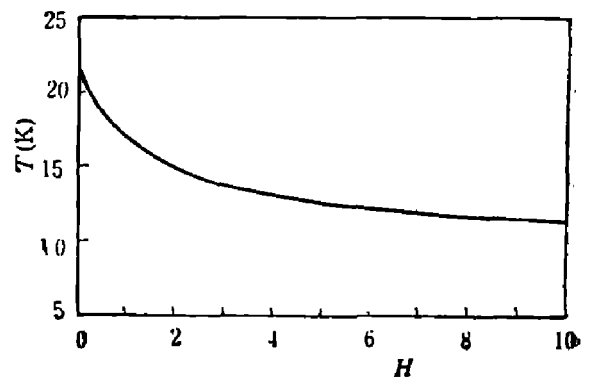


图 3 T 的平均值随 H 的变化关系
($K=60$, $C=30$, $f=1$, $\sigma_\alpha=0.1$, $\sigma_{k'}=0.1$,
 $T_0=300\text{ K}$, $T_s=310\text{ K}$)

Fig. 3 Average of T vs. H

地表温度分布不受空气温度影响。而当 H 值变大(风速增大)时,分布曲线的峰值温度趋于空气的稳定温度。同样,地表的平均温度也将趋于空气的稳定温度,其变化曲线如图 3 所示。

地表温度的空间起伏方差随风场的变化关系如图 4 所示。由图 4 可见,随着风场的增强(即热对流的增强),地表温度方差显著下降。这一点对于地表的热辐射图像具有重要的

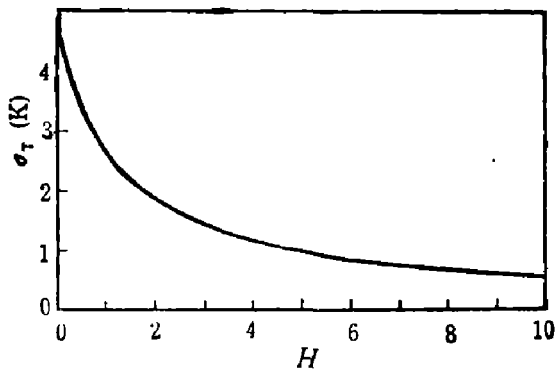


图 4 T 的方差随 H 的变化关系
($K=6$), $C=30$, $f=1$, $\sigma_a=0.1$, $\sigma_r=0.1$,
 $T_0=300$ K, $T_s=310$ K)

Fig. 4 Variance of T vs

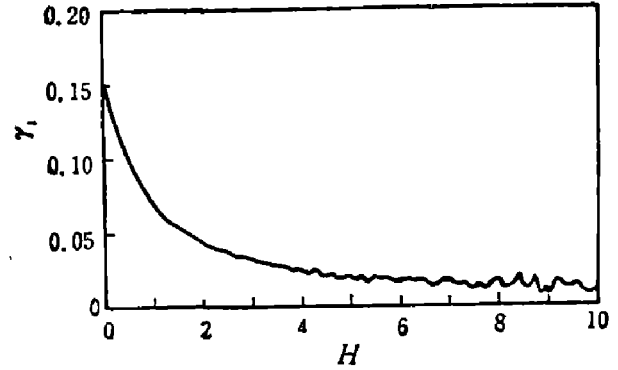


图 5 $P(T)$ 曲线的偏斜度随 H 的变化关系
($K=60$, $C=30$), $f=1$, $\sigma_a=0.1$, $\sigma_r=0.1$, T_0
 $=300$ K, $T_s=310$ K)

Fig. 5 Skewness of the curve of $P(T)$ vs H

意义,因为正是地表温度场的空间起伏构成了地表的热辐射图像,而图像对比度正比于温度起伏方差。这样,随着风场的加强,地表红外热图像的对比度将大为降低。

温度概率分布曲线的非对称性是地表辐射场的一个重要特征^[5],由于风场的存在,此非对称性亦将受到影响。由图 5 可以看出:当风速低于一定值时(如对图中条件 $H \approx 4$),概率密度分布曲线的偏斜度 γ_1 随风速的增大而显著下降;而当风速超过这一定值时, γ_1 减小不明显,只有小范围起伏变化。对于概率密度分布曲线的峰态 β_2 同样可以观察到类似的现象。当 $H \leq 4$ 时, β_2 缓慢减小趋于标准值 3,而当 $H > 4$ 时,则有剧烈的起伏,如图 6 所示。

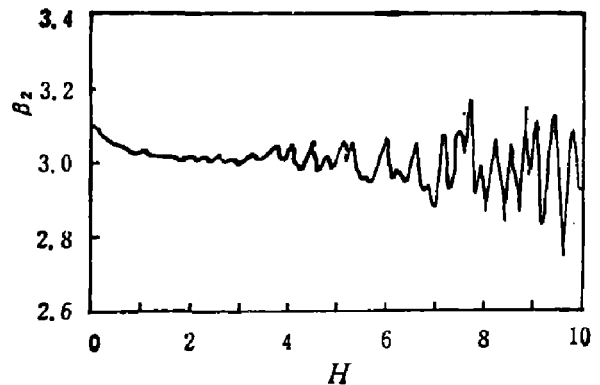


图 6 $P(T)$ 曲线的峰态随 H 的变化关系
($K=60$, $C=30$), $f=1$, $\sigma_a=0.1$, $\sigma_r=0.1$,
 $T_0=300$ K, $T_s=310$ K)

Fig. 6 Kurtosis of the curve of $P(T)$ vs. H

4 讨 论

在热平衡方程中对地表热辐射项取一级近似较为合适。为揭示零级近似与一级近似的差别,我们将无风场时使用一级近似与零级近似所得 T 的概率密度分布曲线作一比较(见图 7),由图 7 可见,两者存在着较大的差别,而从图 3~6 可看出:无风场时($H=0$), T 的均值、方差、偏斜度、峰态使用一级近似获得的值均比使用零级近似获得的值接近于用模拟方

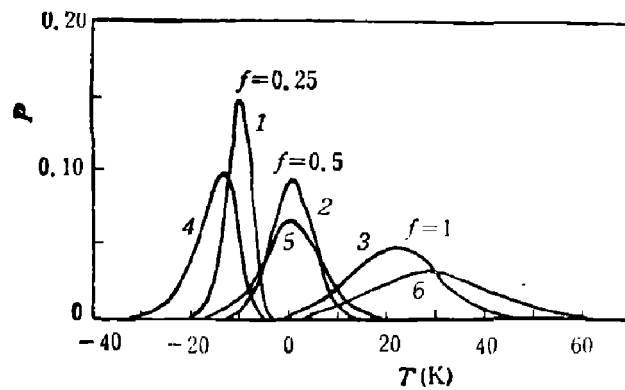


图7 两种近似下 T 的概率密度分布
 ($H=0, K=60, C=30, \sigma_a=0.2, \sigma_r=0.2, T=300\text{ K}$)
 1、2、3——级近似, 4、5、6——零级近似

Fig. 7 The probability density distribution of T for two kinds of approximations
 curves 1, 2, 3 correspond to the first-order approximation, and 4, 5, 6 to the zero-order one

法获得的热平衡方程的严格解。而使用一级近似时并未在热平衡方程中引入非线性项, 因而未增加分析难度, 故我们认为以使用一级近似为宜。

从我们所作的风场对地表红外辐射图像的统计特性的影响的分析中, 可以观察到风场影响的饱和特征, 对诸如平均温度、温度的起伏方差这些直接影响地表热辐射特性的量, 其饱和值是稳定的; 而概率密度分布曲线的特征量如偏斜度、峰态则在风场达到饱和值时发生起伏。这个现象的原因与意义我们将在以后进一步分析。

参 考 文 献

- 1 Scoggins R K. *SPIE.*, 1987; 781:50
- 2 Ben-Yosef N et al. *SPIE.*, 1987; 819:66
- 3 D'Agostino J A. *SPIE.*, 1987; 781:2
- 4 Eckert E R G, Drake Jr R M. *Analysis of heat and mass transfer*, McGraw-Hill Inc, 1972: 243
- 5 Ben-Yosef N. *Appl. Opt.*, 1985; 24(23): 4167

NATURAL TERRAIN INFRARED RADIATION STATISTICS IN A WIND FIELD

RAO RUIZHON SONG ZHENGFANG

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Hefei, Anhui 230031, China)

Considering the heat convection in a wind field, the infrared radiation statistics of natural terrain is analyzed by the heat balance equation. The first-order approximation is used for the radiation term in the equation. The results show that the heat convection will change the statistical distribution of the radiance in the thermal image of natural terrain. With the increase of wind speed, the most probable and average temperature will trend to the steady air temperature, and the contrast of the thermal image will decrease. The saturation phenomena of the convection effect are pointed out.

Key words: Thermal image, infrared radiation, terrain, wind field.