

随机风场对自然地表红外辐射 统计分布的影响

魏合理 宋正方

(中国科学院安徽光机所, 安徽, 合肥, 230031)

摘要 根据地表稳态热平衡方程, 考虑自然地表的潜热和感热及大气热辐射的作用, 分析了随机风场中裸露地表热辐射的统计特性, 结果表明: 地表辐射温度分布的概率密度、平均值、方差、偏斜度和峰态随着平均风速及其起伏而变化, 由于地表潜热的交换, 其平均温度显然低于无潜热交换的干燥裸露地表的平均温度。

关键词 地表辐射, 风速起伏, 红外热图像。

引言

自然地表红外辐射统计分布特性对地表目标探测的背景识别和地质学的应用具有重要价值, 近年来受到很大关注. N. Ben-Yosef^[1]研究了无风、干燥、裸地的红外辐射统计性质. 文献[2, 3]研究了在风场条件下地表的红外辐射统计特性.

当植被存在时, 自然地表红外辐射统计特性受局地气象条件和植被生理条件支配, 并伴随着潜热的交换. 文献[1~3]没有考虑潜热的影响, 因此, 其分析结果只适用于干燥、无植被的沙漠地带. 风在地表附近的物质和热量的交换中起着非常重要的作用. 本文根据地表稳态热平衡方程, 考虑地表的潜热和感热及大气热辐射的作用, 分析了风速及其起伏对裸露地表红外辐射统计分布的影响.

1 地表热平衡方程

有植被存在时, 地表热平衡方程为^[4]

$$H = C + \lambda E, \quad (1)$$

式(1)中 C 为感热, λE 为潜热. 假设忽略植物因光合作用而转化成的化学和生物能, 则植被上方总热通量 H 可写为

* 本文1995年2月20日收到, 修改稿1995年5月8日收到

$$H = Q_{sun} + Q_{atm} - Q_{cd} - Q_r, \quad (2)$$

式(2)中 Q_{sun} 和 Q_{atm} 分别为单位地表单位时间内吸收的太阳辐射和大气辐射的能量, Q_{cd} 和 Q_r 分别为单位地表在单位时间内向地下热传导和大气中热辐射而释放的能量, 其表达式为

$$Q_{sun} = \alpha E_s, \quad (3)$$

$$Q_{atm} = \varepsilon R_a, \quad (4)$$

$$Q_{cd} = \lambda_0 (T - T_0), \quad (5)$$

$$Q_r = \varepsilon \sigma T^4; \quad (6)$$

式(3)~(6)中, α 为地表对太阳短波辐射的吸收系数, ε 为地表发射率, λ_0 为一正比于土壤热传导系数的常量, E_s 和 R_a 分别为到达地表的太阳辐射能和大气热辐射能, σ 为 Stefan-Boltzmann 常数, T 为地表温度, T_0 为地下的土壤温度.

对低矮型的植被地表(如草地等), 其感热交换项 C 可表示为^[4,5]

$$C = \rho C_p (T - T_a) / R_{ac}, \quad (7)$$

空气动力学阻抗 R_{ac} 为

$$R_{ac} = \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \right]^2 / (u_a k^2), \quad (8)$$

潜热交换项 λE 除受空气动力学阻抗阻碍外, 还与植被的气孔阻抗 R_c 有关, R_c 是植被的生理因子, 它只与植被各个单叶和叶层的气孔状态有关, λE 可表示为^[4,5]

$$\lambda E = \frac{\rho C_p [e_w(T) - e_T]}{\nu (R_{ac} - R_c)}, \quad (9)$$

式(7)~(9)中 u_a , T_a 为离地面高度 z 处的风速和气温, $k \approx 0.41$ 为 Karman 常数, z_0 为地面粗糙度, d 为气流零平面位移高度, ρ , C_p 为空气密度和定压比热, ν 为热力学湿度常数, $e_w(T)$ 为温度为 T 时的饱和水汽压, $e_{T_a} = RH e_w(T_a)$, RH 为空气的相对湿度.

式(8)中 u_a 为非线性项, 对于本文所关心的问题, 难以得到简单的解析解. 现考虑较为简单的裸露地表的情况, 此时式(9)可简化为^[5]

$$\lambda E = \rho L W_s [q_w(T) - q_a] / R_{ac}, \quad (10)$$

其中 L 为气化潜热, W_s 为地表含水量因子, $q_w(T)$ 为温度为 T 时饱和比湿, $q_a = RH q_w(T_a)$.

式(6)和式(10)中出现 T 的非线性项, 不易求解, 为此, 令 $T = T_0 + t$, $T_a = T_0 + t_a$ 则式(6)可简化为

$$Q_r \approx \varepsilon \sigma T_0^4 + 4\varepsilon \sigma T_0^3 t, \quad (11)$$

式(10)可简化为

$$\lambda E \approx k_2 \Delta (t - t_a) u_a + k_2 (1 - RH) q_w(T_a) u_a. \quad (12)$$

其中令: $k_1 = \rho C_p k^2 / \left[\ln \frac{z-d}{z_0} \right]^2$, $k_2 = L W_s$, $k_1 / (k^2 C_p)$, $\Delta = [q_w(T) - q_w(T_a)] / (T - T_a)$, 在温度

变化范围不大时,饱和比湿的温度变化率 Δ 可看作常量.

由此,把上面有关式子代入式(1)中,可得

$$t = \frac{\alpha E_s + C_1 + C_4 C_3 / C_2}{C_2 u_a + C_3} - C_4 / C_2 + t_a, \quad (13)$$

其中 $C_1 = \epsilon R_a - \epsilon \sigma T_0^4 - 4\epsilon \sigma T_0^3 t_a - \lambda_0 t_a$, $C_2 = k_1 + k_2 \Delta$, $C_3 = 4\epsilon \sigma T_0^3 + \lambda_0$, $C_4 = k_2 q_w(T_a)(1 - RH)$.

2 地表红外辐射的统计分析

地表红外辐射图像 E_r 正比于地表辐射温度 t , 因而 t 的统计特性就是 E_r 的统计特性. 由于地面的粗糙度、湍流及温度分布的空间差异, 使得近地面的风速是一有起伏的随机变量, 而风速是影响地表能量分布的重要参数, 因此, 本文着重讨论风速及其起伏对地表红外辐射统计特性(温度分布的概率密度、平均值、标准差、偏斜度和峰态)的影响.

考虑 α 和 u_a 为随机变量, 并假定它们为互相独立的正态分布, 其平均值和标准差分别为 $\langle \alpha \rangle$ 和 σ_α 及 $\langle u_a \rangle$ 和 σ_{u_a} , 并令: $A = \langle \alpha \rangle E_s + C_1 + C_4 C_3 / C_2$, $B = C_2 \langle u_a \rangle + C_3$, $\sigma_1 = E_s \sigma_\alpha$, $\sigma_2 = C_2 \sigma_{u_a}$, 则式(13)右边第一项可以看作两个互相独立的随机变量(X 和 Y)的商, X 和 Y 的平均值和标准差分别为 A 和 σ_1 及 B 和 σ_2 , 令 $z = t - C_4 / C_2 + t_a$, 则 z 的概率密度分布为^[6]

$$P(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_x(y) f_y(yz) |z| dy = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\frac{(y-A)^2}{2\sigma_1^2} - \frac{(yz-B)^2}{2\sigma_2^2}\right] |z| dy$$

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

$$P(t) = P(z + C_4 / C_2 - t_a), \quad (15)$$

其中, $x = \frac{b}{a^{1/2}}$, $a = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 z^2}{2\sigma_1^2\sigma_2^2}$, $b = \frac{B\sigma_1^2 + A\sigma_2^2 z}{2\sigma_1^2\sigma_2^2}$, $c = \frac{B^2\sigma_1^2 + A^2\sigma_2^2}{2\sigma_1^2\sigma_2^2}$, $\operatorname{erf}(x)$ 为误差函数. 图 1 给出了平均风速 $\langle u_a \rangle$ 为 1、2 和 5 m/s, 标准差 σ_{u_a} 为 0.15 和 0.3 m/s 时 t 的概率密度分布曲线, 计算时其它的参数分别为^[2-3]: $E_s \langle \alpha \rangle = 60$; $\epsilon R_a = 10$, $\epsilon \sigma T_0^4 = 27$, $\lambda_0 = 1$, $\sigma_\alpha = 0.1$, $T_0 = 300\text{K}$, $T_a = 305\text{K}$, $k_1 = 0.25$, W_a 取为地表空气中水汽达到饱和时的值, $RH = 60\%$ (下同).

从图 1 中可看出, 随着平均风速的增大, 地表温度的概率密度曲线的峰值变大, 而平均温度则明显降低, 另一方面, 当 $\langle u_a \rangle$ 较小时, 随着风速起伏 σ_{u_a} 的增大, 地表温度的概率密度曲线的峰值略有变小, 且略向高温处展宽, 当平均风速 $\langle u_a \rangle$ 增大时, σ_{u_a} 对温度概率密度分布的影响很微弱.

图 2 表明风速起伏对平均温度的影响不明显, 但随着平均风速的增大, 地表平均温度迅速减小, 这主要是由于潜热和感热都随风速的增大而增大造成的.

同文献[3]相比, 本文得到的平均温度显然偏低, 这是符合客观事实的, 因为地表的潜热交换要带走部分热量, 对于潮湿地表, 这是主要的热量交换项, 因而, 与干燥裸露地表相比, 考虑潜热时, 其辐射能显然偏低.

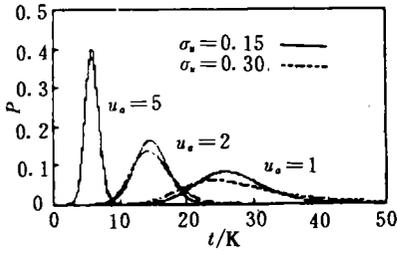


图 1 不同风速下温度的概率密度分布
Fig. 1 The probability density of temperature for various wind speed

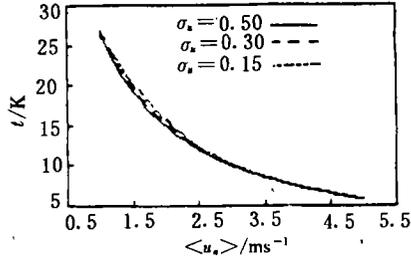


图 2 不同 σ_u 时 t 的平均值随平均风速 $\langle u_a \rangle$ 的变化
Fig. 2 Average of t vs. $\langle u_a \rangle$ for various σ_u

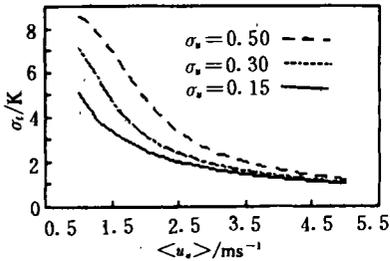


图 3 不同 σ_u 时 t 的方差随平均风速 $\langle u_a \rangle$ 的变化
Fig. 3 Standard deviation of t vs. $\langle u_a \rangle$ for various σ_u

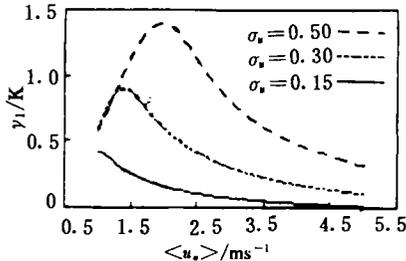


图 4 不同 σ_u 时 t 的偏斜度随平均风速 $\langle u_a \rangle$ 的变化
Fig. 4 Skewness of t vs. $\langle u_a \rangle$ for various σ_u

图 3 是 3 种风速起伏下地表辐射温度的起伏方差 σ_t 随平均风速 $\langle u_a \rangle$ 的变化曲线,从
中可以看出, σ_t 随 $\langle u_a \rangle$ 的增大逐渐减小, 随 σ_u 的增大有显著的增加, 即随着风速起伏的增大, 地表温度起伏也随之增大, 对应地表热红外图象的对比度也显著增加, 但随着平均风速的增大, 这种效应逐渐减弱. 上述结论是符合湍流理论的, 风速起伏和温度起伏是大气湍流的不同表现, 自然是正相关的, 而平均风速的增大将扼制湍流, 地表温度的起伏也将减弱.

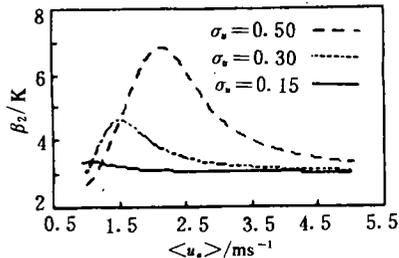


图 5 不同 σ_u 时 t 的峰态随平均风速 $\langle u_a \rangle$ 的变化
Fig. 5 Kurtosis of t vs. $\langle u_a \rangle$ for various σ_u

风速及其起伏对温度分布的非对称性也有影响, 而此非对称性是地表辐射场的一个重要特征. 图 4 和图 5 分别是不同风速起伏下的温度分布的偏斜度和峰态系数随平均风速 $\langle u_a \rangle$ 变化曲线. 从中可以看出, 随着平均风速 $\langle u_a \rangle$ 的增大和风速起伏 σ_u 的减小, 温度分布曲线趋向于对称, 即偏斜度 γ_1 趋向 0, 而峰态系数 β_2 趋向于 3, 这表明当风速 $\langle u_a \rangle$ 较大和风速起伏 σ_u 较小时, 地表温度的空间起伏趋向于正态分布.

结 语

本文用简单的热平衡方程, 考虑自然地表的潜热和感热及大气热辐射的作用, 分析了风

速及其起伏对裸露地表红外辐射统计分布的影响,结果表明:(1) 考虑地表潜热交换时,其平均温度明显低于无潜热交换时干燥、裸露地表的平均温度;(2) 平均风速增大,带走的热能也增大,导致地表温度降低;(3) 风速起伏对地表平均温度无多大影响,但能导致地表温度起伏的增大,并使地表红外辐射热图像的对比度显著增加,但随着风速的增加而迅速减小;(4) 当风速增大(风速起伏较小时),地表温度的空间起伏趋向于正态分析。

应当指出,我们在推导中假设地表吸收太阳能量的空间差异和风速起伏为互相独立的正态分布,这种假设可能是不十分严格的,尽管如此,我们得到的结论是符合热力学理论和客观事实的。

参考文献

- 1 Ben-Yosef N, *et al.* *Appl. Opt.*, 1985; **24**(23):4167
- 2 饶瑞中,宋正方. *红外与毫米波学报*, 1991; **10**(2):141
- 3 董国权,李正直. *红外与毫米波学报*, 1993; **12**(6):459
- 4 Thom A S. *In Vegetation and the Atmosphere, Volume 1, Principles*, London:Academic Press, 1975:57
- 5 张建奇,等. *红外与毫米波学报*, 1994; **12**(6):418
- 6 盛 骤,等. *概率论与数理统计*(第 2 版),北京:高等教育出版社,1989:87~91

INFLUENCE OF RANDOM WIND FIELD ON THE INFRARED RADIANCE STATISTICS DISTRIBUTION OF NATURAL TERRAIN

Wei Heli Song Zhengfang

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract The infrared radiance statistics of natural terrain in a random wind field was analyzed based on the heat balance equation, in which the effects of latent and sensible heat exchanges and atmospheric thermal radiation are under consideration. The results show that the statistics distribution, average value, variance, skewness and kurtosis of radiative temperature of bare terrain vary not only with the average wind speed, but also with the fluctuation of wind. As a result of the latent heat exchange, the average temperature of natural terrain is obviously lower than that of dry bare ground, where there is no latent heat exchange.

Key words ground terrain radiance, wind speed fluctuation, infrared thermal image.