

干燥裸地红外辐射统计特性： 发射率起伏的影响*

董国权 李正直

(杭州大学物理系, 浙江, 杭州, 310028)

摘要: 根据干燥裸露地表的稳态热平衡方程, 考虑到地表的感热交换和天空热辐射的作用, 用 Monte-Carlo 方法分析了风场下地表发射率空间起伏对裸露地表红外辐射统计特性的影响. 结果表明: 由于地表发射率在空间的起伏变化, 地表热红外图像的反差将显著增加; 地表辐射温度概率密度分布的偏态与峰度也不同程度地发生变化.

关键词: 红外背景, 热图像, 地表辐射, 辐射统计模型.

引言

N. Ben-Yosef 等^[1,2]考虑了太阳辐射、地表的热传导和地表热辐射三者之间的能量平衡, 假定地表的短波吸收系数和热传导系数为两个互相独立的正态分布随机变量, 研究了无风条件下干燥裸地的红外辐射统计性质. 文献 [3] 考虑到自然环境中感热交换, 分析了风场下干燥裸地的红外辐射统计特性.

在自然环境中, 地表发射率随空间位置不同而有一定的变化^[4], 而且对辐射温度将产生较大的影响^[5]. 本文针对干燥裸露地表, 假定地表的短波吸收系数、热传导系数和发射率三者为互相独立的正态分布随机变量, 分析了风场下干燥裸地的红外辐射统计特性. 由于在同一热平衡方程中引入了三个随机变量, 用常规方法很难计算出辐射温度概率分布的表达式, 我们采用了 Monte-Carlo (M-C) 方法来模拟计算, 该方法能方便有效地分析多维随机变量时的情况.

1 地表热平衡方法

干燥裸露地表表面处的热平衡方程为^[3]

本文 1992 年 6 月 12 日收到, 修改稿 1993 年 6 月 5 日收到.

* 国家自然科学基金资助项目.

$$Q_{\text{sun}} + Q_{\text{sky}} - Q_{\text{cd}} - Q_{\text{cv}} - Q_r = 0, \quad (1)$$

式(1)中 Q_{sun} 、 Q_{sky} 、 Q_{cd} 、 Q_{cv} 和 Q_r 分别为单位地表在单位时间内吸收的太阳辐射能量和吸收的天空热辐射能量以及通过热传导, 感热交换和辐射三种形式释放的能量.

式(1)与文献[3]比较, 增加了地表吸收的天空热辐射能量 Q_{sky} . Q_{sky} 是地表热平衡中一项重要的分量, 它随大气情况不同而发生变化, 它与 Q_r 常处于同一量级.

设地表对太阳短波辐射能的吸收系数为 α , 发射率为 ε , 辐射温度为 T_s , 并以热传导方式向温度为 T_0 的地下转移, 式(1)中各分量则分别为^[3]

$$Q_{\text{sun}} = \alpha E, \quad (2)$$

$$Q_{\text{sky}} = \varepsilon R_D, \quad (3)$$

$$Q_r = \varepsilon \sigma T_s^4, \quad (4)$$

$$Q_{\text{cd}} = -\lambda_0 \frac{\partial T}{\partial Z}. \quad (5)$$

式(2)~(5)中, E 、 R_D 分别为到达地表面处的太阳辐射能和天空的热辐射能, λ_0 为土壤热传导系数, σ 为玻尔兹曼常数.

考虑到地表下几十厘米处土壤温度 T_0 变化很小, 式(5)可进一步表示为^[1,2,3]

$$Q_{\text{cd}} = \lambda(T_s - T_0), \quad (6)$$

式(6)中 λ 为一正比于地表土壤热传导系数的比例常数.

地表的感热交换可表示为^[6]

$$Q_{\text{cv}} = \frac{\rho C_p U_a k^2}{[\ln(Z/Z_0)]^2} (T_s - T_a), \quad (7)$$

式(7)中 T_a 与 U_a 为离地面高度为 Z 处的气温和风速, k 为卡曼常数, Z_0 为地表的粗糙度长度, ρ 、 C_p 分别为空气密度与定压比热.

设 $T_s = T_0 + T$, 取 Q_r 关于 T 的一级近似项^[3], 把式(2)~(7)代入式(1), 并记 $h = \rho C_p U_a k^2 / [\ln(Z/Z_0)]^2$, 得

$$T = \frac{\alpha E - h(T_0 - T_a) - \varepsilon \sigma T_0^4 + \varepsilon R_D}{\lambda + h + 4\varepsilon \sigma T_0^3}. \quad (8)$$

令 $x_1 = \frac{\lambda}{\langle \lambda \rangle}$, $x_2 = \frac{\varepsilon}{\langle \varepsilon \rangle}$, $x_3 = \frac{\alpha}{\langle \alpha \rangle}$, $H = \frac{h}{\langle \lambda \rangle}$, $K = \frac{E_{\text{max}} \langle \alpha \rangle}{\langle \lambda \rangle}$, $E = E_{\text{max}} f(t)$, $G_0 = \frac{\langle \varepsilon \rangle R_D}{\langle \lambda \rangle}$, $G_1 = \frac{4G_2}{T_0}$, $G_2 = \frac{\langle \varepsilon \rangle \sigma T_0^4}{\langle \lambda \rangle}$. 其中 $\langle \lambda \rangle$ 、 $\langle \varepsilon \rangle$ 、 $\langle \alpha \rangle$ 为 λ 、 ε 和 α 的平均值, E_{max} 为太阳辐射能的最大值, $f(t)$ 为太阳辐射能的时间变化函数. 从而式(7)可进一步表示为

$$T = \frac{K f x_3 - H(T_0 - T_a) + (G_0 - G_2)x_2}{x_1 + H + G_1 x_2}. \quad (9)$$

设 α 、 λ 和 ε 为互相独立、服从正态分布的随机变量, 其方差分别为 σ_α 、 σ_λ 和 σ_ε , 均值分别为 $\langle\alpha\rangle$ 、 $\langle\lambda\rangle$ 和 $\langle\varepsilon\rangle$. 且 x_1 、 x_2 和 x_3 的均值均为 1, 方差分别为 $\sigma_{x_1} = \frac{\sigma_\lambda}{\langle\lambda\rangle^2}$, $\sigma_{x_2} = \frac{\sigma_\varepsilon}{\langle\varepsilon\rangle^2}$, $\sigma_{x_3} = \frac{\sigma_\alpha}{\langle\alpha\rangle^2}$. 由式 (9) 可见, 由于 x_1 、 x_2 和 x_3 为随机变量, 所以 T 也即为具有一定分布的随机变量, 这说明, 由于地表发射率、吸收率及热传导率空间分布起伏导致了地表辐射温度在空间具有一定的分布.

2 Monte-Carlo 模拟

从式 (9) 看出, T 是关于随机变量 x_1 、 x_2 和 x_3 的复合函数, 而 x_1 、 x_2 和 x_3 为正态分布, 相应的分布函数是确定的. 从理论上说给定 x_1 、 x_2 和 x_3 的分布, 即可求出 T 的概率密度分布, 但在实际计算中, 由于随机变量的个数增加及函数关系的繁复, 往往难以计算 T 的分布函数. 为此本文采用 M-C 模拟方法计算 T 的概率密度分布函数. 模拟过程中, 先由计算机产生三个相互独立, 均值为 1.0, 方差分别为 σ_{x_1} 、 σ_{x_2} 和 σ_{x_3} 按正态分布的随机变量, 然后按式 (9) 计算 T , 并经统计分析得到 T 概率分布的均值、方差、偏态和峰度 4 个特征参数, 它们对应于热红外图像的 1~4 价统计矩.

表 1 为我们编制的模拟程序对正态分布随机数的一种检验方法. 对 $N(1, 0.1)$ 的正态分布随机数, 其均值为 1.0, 方差为 0.1, 偏态和峰度均为 0. 从表 1 中可见, 随着 N 的增加, 模拟精度逐渐提高; 其收敛速度正比于 $1/\sqrt{N}$; 另外, 模拟计算时间随 N 增加而成正比增加. 可见, 采用 M-C 方法必须要在精度与速度上折衷考虑. 本文计算中取 $N=10000$.

表 1 模拟程序对正态分布随机数的计算

Table 1 Result of normally distributed random number test of the program

随机试验次数 N (次)	1000	2000	5000	10000	15000
均 值	0.99740	0.99561	0.99934	0.99875	0.99936
方 差	0.09857	0.10022	0.09964	0.09965	0.10006
偏 态	0.11710	2.6625E-2	-8.5974E-3	5.1266E-3	5.4196E-3
峰 度	2.9135	2.9405	2.9861	3.0220	3.0108
相对计算时间 (s)	1.0	2.01	5.07	10.15	15.23

3 结果与分析

为分析地表发射率起伏对风场下地表辐射温度分布的影响, 我们用 M-C 方法分别计算了发射率分布方差 σ_{x_2} 为 0, 0.1 和 0.2 时, 地表辐射温度随 H 的变化. 当 $\sigma_{x_2}=0$, 即表示不考虑地表发射率的起伏, 此时 $x_2=1$, 由式 (9) 可知, 这种情况即为文献 [3] 所考虑的情形, 采用统计计算, 可由式 (9) 从理论上分析得出关于 T 的概率密度分布的解析式. σ_{x_2} 分别为 0, 0.1 和 0.2 时, 用 M-C 方法得到的温度 T 的概率密度分布的均值、方差、峰度与偏态随 H 的变化 (见图 2). 其它计算值分别为: $K=60$, $G_2=27$, $G_0=10$, $T_0=300$ K, $T_a=305$ K, $f=1.0$, $\langle\varepsilon\rangle=0.9$. 为了比较图中同时也给出了 $\sigma_{x_2}=0$ 时利用理论分析方法

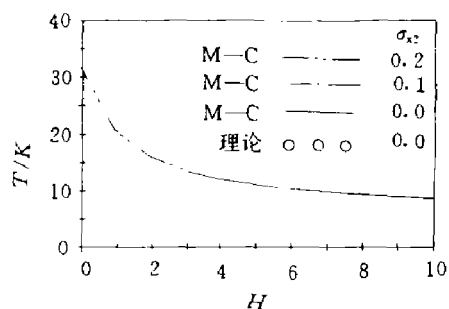


图 1 T 的均值随 H 的变化
Fig. 1 Average value of T vs. H

随着 σ_{x_2} 增加, 偏态 S 与峰度 K 均增加, 同样, 随着风速增加由发射率起伏引起分布曲线非对称性的变化也就迅速减小.

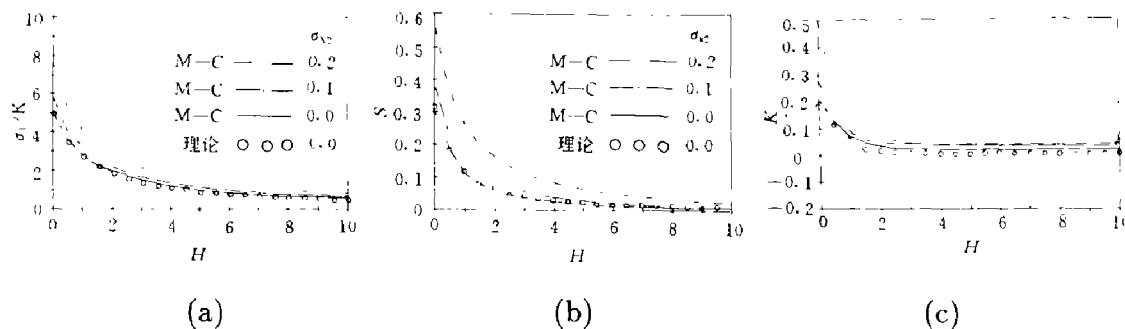


图 2 不同 σ_{x_2} 时 T 的方差、峰值和偏态随 H 的变化

(a) 方差随 H 的变化; (b) 峰度随 H 的变化; (c) 偏态随 H 的变化

Fig. 2 Variance kurtosis and skewness as a function of H for various σ_{x_2}

用 M-C 方法模拟计算地表辐射温度的分布, 其误差主要来源于 x_1 、 x_2 和 x_3 正态分布的随机抽样误差, 一旦 x_1 、 x_2 和 x_3 确定, 则按式 (9) 计算, 不会再引入其它误差. 从表 1 可见, 随 N 增加, 抽样误差随之减小, 但考虑到计算效率, 在模拟计算中我们取 $N=10000$. 详细模拟误差可由 N 与 σ_T 计算得到^[7], 对图 1-2 中各点的概率误差均小于 5.2%.

值得注意的是, 文献 [3] 得到的温度概率分布曲线的峰度与偏态当 $H > 4$ 时将产生无规则的振荡. 据我们的计算分析, 这是由于温度分布曲线的均值计算误差所致. 当 H 较大时, 分布曲线的偏态与峰度均很小, 此时如在均值计算中产生 0.01 K 的误差, 就会使偏态与峰度出现振荡的结果.

4 结语

由于 M-C 方法不受随机变量个数的影响, 用该方法来研究多变量情况下的地表辐射

的计算结果, 从图中可见本方法与用理论方法计算结果是一致的.

图 1 为不同的 σ_{x_2} , 温度 T 分布均值随 H 的变化, 其均值不随 σ_{x_2} 变化, 因为 σ_{x_2} 不同只表示地表发射率起伏程度的不同, 但其均值是相同的. 分布函数的方差 σ_T 随 σ_{x_2} 的增加而增加, 这说明随地表发射率空间起伏增加, 对应的地表热红外图像的对比度也随之增加, 因为红外图像的对比度正比于温度起伏的方差. 然而随风速增加, 这种影响就迅速变小 (见图 2(a)). 由图 2(b), 2(c) 看出, 由于发射率空间起伏, 温度概率分布曲线的非对称性也随之受到影响.

温度的统计特性是非常简便有效的, 特别是针对多维随机变量的情况, 而用统计理论方法计算往往难以得到分布函数的解析表达式.

地表发射率的起伏将对地表辐射温度的分布函数的方差及非对称性产生一定的影响. 随着发射率起伏的增加, 分布函数的方差, 偏态与峰度均增加, 但随风速的增加, 由发射率起伏导致分布函数方差、偏态和峰度的变化迅速变小.

参考文献

- 1 Ben-Yosef N *et al.* *Appl. Opt.*, 1985;24(23):4167
- 2 Ben-Yosef N *et al.* *SPIE*, 1987;819:66
- 3 饶瑞中, 宋正方. *红外与毫米波学报*, 1991;10(2):141
- 4 Labeled J, Stoll MP. *Remote Sens. Environ.*, 1991;38:1
- 5 Wolfe WL. *Appl. Opt.*, 1975;14(8):1937
- 6 Camillo P J *et al.* *Water Resources Research*, 1983;19(2):371
- 7 裴鹿成, 张孝泽. *蒙特卡罗方法及其在粒子输运问题中的应用*, 北京: 科学出版社, 1986, P10

INFRARED RADIANCE STATISTICS OF DRY BARE GROUND TERRAIN: THE EFFECT OF EMISSIVITY VARIATION*

DONG GUOQUAN, LI ZHENGZHI

(*Department of Physics, Hangzhou University, Hangzhou, Zhejiang 310028, China*)

Abstract: The influence of variation of bare ground terrain emissivity on its infrared radiance statistics under wind conditions is analyzed by Monte-Carlo simulation. The radiance is governed by the heat balance equation in which the sensible heat exchange and sky thermal radiation are under consideration. The results show that, because of emissivity variation, the contrast of a thermal image of bare ground terrain will become sharp obviously and the skewness and kurtosis of the radiative temperature distribution will also change accordingly.

Key words: infrared background, thermal image, ground terrain radiance, radiance statistical model.

*The project supported by the National Natural Science Foundation of China.