7C02247

TDI LIBRARY SERVICES
11340
Olympic Blvd.
Suite 355
Los Angeles
California
90064-1639
P (310) 268-0601
F (310) 268-0701
tdi@tdico.com

BILL TO

Ut-Battelle
Bldg. 4500N, MS-6193
PO Box 2008
Oak Ridge, TN 37831-6193
USA

SHIP TO

James Kidder
Ut-Battelle

Date Rec'd
03/02/2007

Need By

Ordered By

P (865) 574-1241 F (865) 574-1240

Requestor
James Kidder

Client Number
52718X

Service & Delivery
REGULAR FedEx

Journal/Book Title
Journal of East China Normal Unviersity (Natural Science)

Author 1
Wang YH

Author 2
Shen GT

Month	Year	Volume	Issue	Pages
	2006			121-6

Article Title
Improvement on the model of IR radiation field of natural terrain

Order Special Instructions
MC: 4500N 6191

Further reproduction may be a violation of copyright law

第5期
2006年9月

华东师范大学学报(自然科学版)
Journal of East China Normal University (Natural Science)

No. 5
Sept. 2006

文章编号:1000-5641(2006)05-0121-06

自然地表红外辐射场模型的改进

王英华, 沈国土, 杨宝成, 蔡继光

(华东师范大学 光谱学与波谱学教育部重点实验室,华东师范大学 物理系,上海 200062)

摘要: 改进了以地表一维热平衡方程为基础的地表红外辐射场的理论模型,该模型考虑了具有不同地形的地表微元之间通过反射和透射等多种形式进行能量交换的物理过程.通过实测数据验证模型后发现,该模型模拟的地表温度比较合理.比较了由该模型和概率分布函数模型计算得到红外波段的辐射值,辐射能量结果基本一致;通过该模型的计算机模拟可以得到自然地表红外辐射场,可以反映辐射能量的空间分布.

关键词: 红外辐射场; 自然地表; 概率分布函数

中图分类号: TN211 **文献标识码:** A

Improvement on the Model of IR Radiation Field of Natural Terrain

WANG Ying-hua, SHEN Guo-tu, YANG Bao-cheng, CAI Ji-guang

(*Key Laboratory of Optical and Magnetic Resonance Spectroscopy, East China Normal University, Department of Physics, East China Normal University, Shanghai* 200062, *China*)

Abstract: Based on the one-dimensional energy equations of the terrain, the IR field model was improved to be able to take various processes of the heat exchange among different parts of terrain into consideration. It was proved that the distribution of the surface soil temperatures obtained by the improved model is suitable in comparison with the experimental value. The IR radiation distribution for the natural terrain was calculated and agreement on the results from the model of distribution function of probability.

Key words: IR radiation field; natural terrain; distribution function of probability

0 引 言

自然地表的红外辐射特性对于军事国防、气象预报和农业等领域具有十分重要的意义[1,2].近年来,地表红外辐射特性的研究受到了越来越多的关注.建立合理的物理模型,利用理论模拟技术模拟土地的红外辐射场不仅可以节省大量的人力和物力,而且可以模拟不同时刻和不同气象条件下的红外辐射场,不失为一种经济有效的方法.

收稿日期:2004-12

第一作者:王英华(1981-),女,硕士研究生;研究方向:红外光学.

通讯作者:沈国土(1970-),男,博士,副教授;研究方向:红外光学;E-mail:gtshen@phy.ecnu.edu.cn

为了获取地表的红外辐射场,研究人员可以通过以下的技术手段和方法:随机统计的方法[1],采用概率密度函数如正态分布、对数正态分布和韦布分布将自然地表红外辐射统计特性及热辐射场空间结构与某一地表光学参数、热物性参数以及环境条件联系起来;贴纹理的方法[2],把计算得到的某种地表温度置于模拟纹理生成的数学模型中,或者通过其它方法获取不同地表的纹理,从而最终获得地表的红外辐射场;分组方法即 mosaic 模型[3],根据不同地表类型性质分成不同的组,分别计算每一组的地表温度和辐射通量,然后再拼结合成自然地表的温度场和辐射场.其中随机统计方法设定的分布往往可以间接表征地表各种能量通量的非均匀性,以 NOAA-AVHRR 数据所提供的长江三角洲地区的地表信息为例,地表温度相关量(1999 年 4 月 6 日 15:00)满足正态分布,借助地表温度的正态分布可以得到地表的辐射能量分布[4].研究发现在应用中分辨率的卫星资料(如 MODIS 和 AVHRR)计算地表太阳净辐射时必须考虑地形影响[5].当地表之间自身辐射能量交换项和太阳的相互交换辐射项量级相当时,地表的辐射模型中也应该考虑地表地形的影响.

为了在物理上更加真实地模拟具有地形起伏的自然地表的能量交换过程,以一维的热平衡公式为基础初步建立了一个地表红外辐射场物理模型.这个模型考虑了地表因地形结构产生的太阳短波、天空长波辐射在地表间的多次能量交换以及地表间长波辐射交换,可以模拟具有地形起伏的自然地表红外辐射场.

1 地表的能量交换过程

假设地表在竖直方向满足一维热平衡方程,自然地表热平衡方程为

$$R_n = E_{sun} + E_{sky} = H + LE + G + M, \tag{1}$$

其中 R_n 是净能量,E_{sky}是天空的长波辐射,E_{sun}是太阳短波辐射;H 是显热交换项,LE 是潜热交换项,G 是传导交换项,M 是地表能量交换项.

具有地形起伏的地表之间因为地表的地形结构,辐射能量必然在地表间以反射和透射方式进行多次的传输,这就将影响地表的温度和辐射场的分布.本文考虑了地表间能量多次反射的情况,其中能量交换的形式如下所述.

1.1 地表间太阳和天空入射能量的交换

入射地表太阳辐射为直接辐射、散射辐射和地形反射辐射之和.利用测量或大气辐射传输模式可以计算到达地表面上太阳直接辐射和散射辐射,然后利用地表地形参数包括坡度、坡向、高度和天空视角计算地形对于能量的影响.太阳的辐射可以由某一表面多次反射再次入射到其它的表面.入射地表的天空长波辐射包括散射辐射和地形反射辐射,同理考虑地表地形影响也会造成对长波能量再次分配.

1.2 自身辐射能量的交换

模型借用了热辐射传递系数的概念,考虑了地表之间的自身辐射能量的交换,辐射能量交换项总的表达式可以表示为

$$M_j = -\varepsilon_j \sigma T_j^4 + \sum F_i \varepsilon_i \sigma T_j^4, \tag{2}$$

其中第二项代表其他各个地表微元对该微元 j 的辐射能量.ε_i 为地表微元 i 的相应发射率,F_i 是能量交换过程中的综合效应因子.以三个地表微元为例,如图 1 考虑地表微元之间的能量交换时,能量交换可以用式(3)-(6)表示.

$$M_B = M_{AB}^{\downarrow} - M_{BA}^{\uparrow} + M_{CB}^{\downarrow}, \tag{3}$$

$$M_{AB}^{\downarrow} = \varepsilon_A \sigma T_A^{\downarrow} \alpha_B, \tag{4}$$

$$M_{BA}^{\uparrow} = \varepsilon_B \sigma T_B^{\downarrow} (1 - \rho_A), \tag{5}$$

$$M_{CB}^{\downarrow} = (F_{CA} \varepsilon_C \sigma T_C^{\downarrow}) \tau_A \alpha_B. \tag{6}$$

如果两地表微元 A、C 都是不透明体，只要考虑微元 A 和微元 C 之间的外表面相互辐射；但是如果微元 A 是一个半透明体，除了考虑上述的辐射以外，还需要考虑微元 B 通过半透明微元 A 的外表面对微元 C 的辐射. 当然微元 B 对微元 A，微元 A 对微元 B 都有影响. 同理，也应考虑微元 C 的能量辐射到微元 A 表面以后透过微元 A 对微元 B 的辐射. 关于微元 B 的能量交换项可以用(3)式表示，其中 M_B 是微元 B 的能量交换项，M_{BA} 表示微元 B 通过 AB 界面所发射的辐射能量，箭头表示相应的方向，M_{AB} 和 M_{CB} 分别表示微元 B 所接收到微元 A 和微元 C 的辐射能量，ρ_A 是微元 A 下表面的反射率，F_{CA} 表示微元 C 对微元 A 的热辐射传递系数. T 为微元真温，脚标 A，B 表示微元序号. (6)式括号中的部分表示微元 C 到微元 A 表面的辐射能量. 以上的考虑代入(1)式即可求解出各微元的温度.

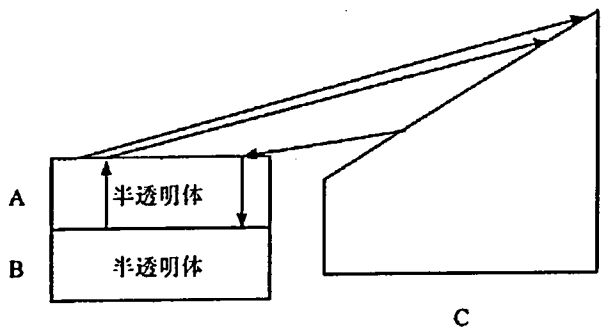

图 1　半透明微元与不透明微元之间的辐射能量交换关系

Fig. 1　The energy transfer between the semitransparent micro-terrain and opacity micro-terrain

2　复杂自然地表辐射的计算

地表的红外辐射场的模拟除考虑在红外波段的自身辐射，还需要考虑红外波段的反射. 对于反射辐射部分，包括地表微元对太阳、天地背景以及其它微元对该微元辐射的反射部分. 因此辐射场的表达式可以写成如下的形式.

$$Q_i = Q_{iself} + \rho_i^{sun} Q_{isun} + \rho_i^{inf\,ra} Q_{isky} + \sum M_{ji} \rho_i^{inf\,ra}, \tag{7}$$

Q_i 是地表微元 i 在 3～5 μm 或 8～12 μm 两个波段中某一个波段总的表观红外辐射. Q_{iself} 为某一波段范围微元 i 的自身辐射，Q_{isun} 是太阳照射到该微元的外表面的某一波段的辐射，包括太阳对该微元的直接辐射和辐射到其它微元以后反射到该微元两部分；类似地 Q_{isky} 是长波源的辐射，ρ_i^{sun} 和 $\rho_i^{inf\,ra}$ 分别为微元 i 对短波源和长波源的相应波段辐射的反射率，M_{ji} 表示微元 j 照射到微元 i 的辐射，公式(7)中的第四项表示微元间的能量交换总量.

3　计算结果

本文模拟 1993 年 8 月 24 日介于 55°54′ N，98°17′ W 和 55°55′ N，98°19′ W 间的加拿大森林地表[6]的辐射过程，计算该地表的真温和表温. 这里利用了 GTOPO30 得到地表地形布

局,GTOPO30 是美国地质调查中心发布的全球数字高程数据,分辨率为经纬度 30″,高度误差在 ±30 m 以内[7]. 计算中所需的参数为:空气的定压比热容 Cp = 1.005 7e³ J/(kg · k),空气密度 ρ = 1.136 kg/m³,其它的气象数据可从网上获得,这里的时间是当地时间,用的是 24 小时制,原始数据如表 1[8].

表 1 实测地表的气象参数

Tab. 1 Meteorological data in boreas TF-10 NSA-OJP tower

当地时间/h	风速/(m · s⁻¹)	空气温度/℃	地表下 5 cm 处土壤温度/℃	空气的湿温度/℃	大气压强(×10⁴ Pa)
0	1.056	12.81	14.27	12.79	1.475 9
6	0.508	12.99	13.83	12.99	1.496 7
12	1.803	15.99	15.73	15.59	1.744 6
18	1.562	17.49	16.48	15.49	1.627 7
24	1.711	12.73	14.17	12.55	1.442 2

地表的主要覆盖植被为北美短叶松,所需表征土壤和植被的参数包括全波段的长短波反射率和长短波吸收率等. 本方法考虑了这些不同的地表微元间能量的交换,而概率密度函数方法即 PDF 方法不考虑地表间能量的交换[4].

图 2 显示采用本方法模拟的地表 5 cm 下温度和实测温度[8]差均在 1.8 K 以内. 不考虑地表之间的相互作用,采用概率方法计算温度值和实测温度值差最大可以达到 4.2 K[9]. 本方法基本反映地表的温度随着时间的变化,但是由于采用了稳态的方法,在 12 点时温度就达到最大值;而实际上由于热量传递的滞后性,18 点温度值要大于 12 点的温度值.

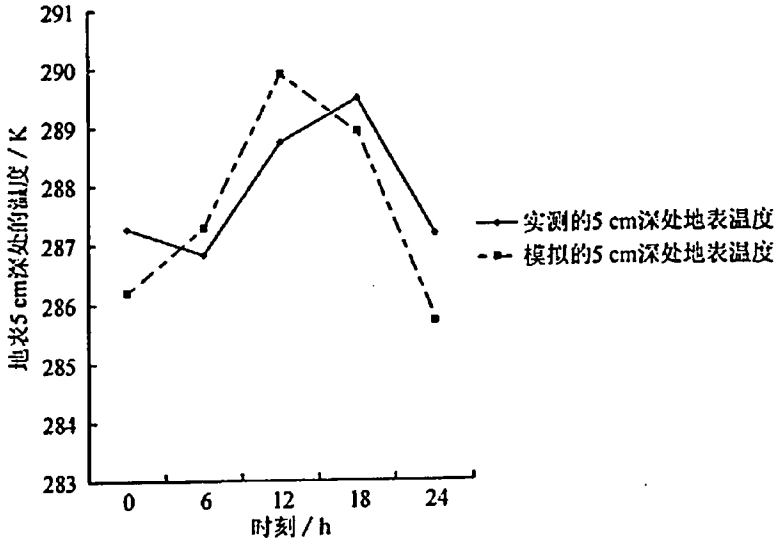

图 2 实测和本方法模拟的地表 5 cm 深处温度比较

Fig. 2 The soil simulated temperature and measured temperature at the depth of 5 cm

本文模拟了地表的红外辐射能量,同时采用 PDF 方法用同样数据模拟地表平均辐射能量,图 3 对两种模拟方法所得到的地表在 3～5 μm 波段辐射值进行比较,最大的相对误差为 3.40%. 采用本方法和采用 PDF 方法模拟地表辐射的辐射能量值接近,基本都可以反映地表辐射随时间的变化,但 PDF 方法估计的能量值偏小. 这主要因为本方法对低平地表和

倾斜地表考虑了多次吸收辐射能量，因而表观辐射能量较大，尤其是在有太阳辐射时.

图 4 为两种方法模拟的地表在 8～12 μm 波段的平均辐射能量随着时间变化的情况，最大的相对误差为 2.51%. 总体上看图 4 和图 3 相比，图 4 模拟能量值差别较大，但是相对误差则要小，各个时刻之间的差比较接近，这是因为在这个波段太阳的影响很小.

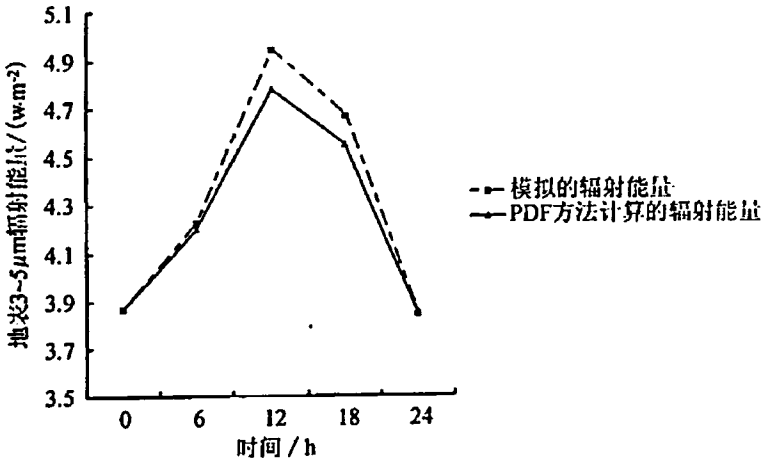

图 3　采用本方法和 PDF 方法生成的 3～5 μm 的辐射能量比较

Fig. 3　The soil radiation by the method of PDF and this model at the band of 3～5 μm

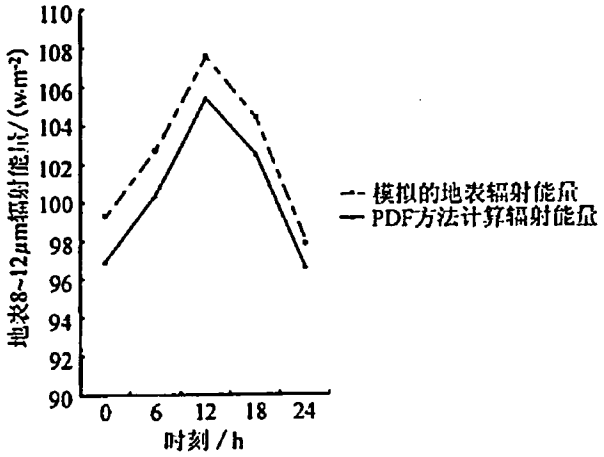

图 4　采用本方法和 PDF 方法生成的 8～12 μm 的辐射能量比较

Fig. 4　The soil radiation by the method of PDF and this model at the band of 8～12 μm

图 5 是 12 点时模拟的整个地表 8～12 μm 红外辐射场分布. 地表因为地形起伏造成能量的交换和传输，其中低平地表和倾斜地表呈现出了辐射值比较低的情形. 倾斜地表因为接受太阳辐射有效面积小，接受的太阳散射辐射较小；低平地表因为倾斜地表的遮避效应，接受辐射较小. 虽然两地表间存在地表相互辐射，但 12 点时太阳能量的作用大于能量交换的作用，所以高层地表的辐射能量要高于这两块地表的透射的辐射能量.

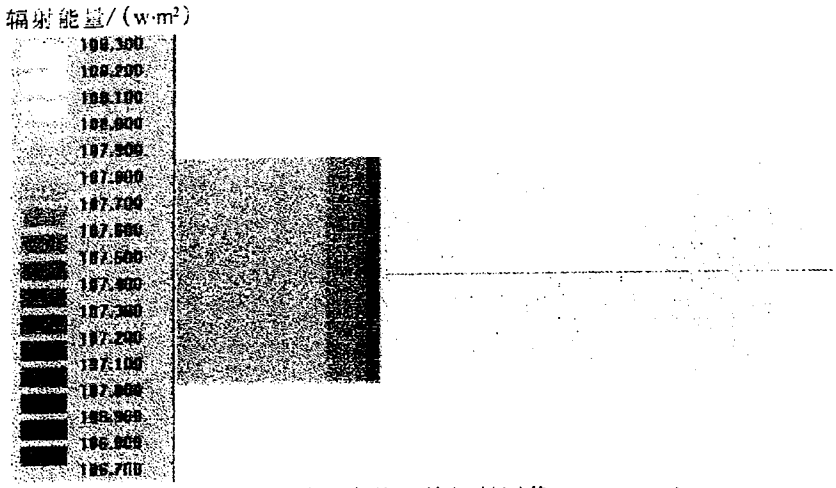

图 5 12 点时地表的红外辐射图像(8～12 μm)

Fig. 5 The IR radiation field of natural terrain at 12 AM

4 结 论

首先用本文建立的地表红外辐射模型模拟了地表的温度,与实测温度进行了比较,该方法可以反映地表的温度随着时间变化的趋势.然后比较了本文的红外辐射模型和 PDF 方法模拟的地表辐射量,两种方法的结果基本一致.因为考虑由于地形产生的能量相互交换,改进的地表红外辐射场的理论模型可以生成较为真实的地表红外辐射场,生成的图象可以反映不同空间的地表温度和辐射的变化.进一步的工作可以将该地表红外辐射模型扩展到更多的地表如雪地等地表红外辐射场理论模拟.

[参 考 文 献]

[1] 张建奇,朱长纯,方小平,等. 湿润地表红外辐射统计特性和热图象空间结构[J]. 西安电子科技大学学报,1999,26(1):53-57.

[2] 邵晓鹏,杨威,张建奇. 自然地表背景红外图象生成方法研究[J]. 红外与激光工程,2000,9(3):11-14.

[3] 韩玉阁,宣益民. 天然地形的随机生成及其红外辐射特性研究[J]. 红外与毫米波学报,2000,19(2):129-133.

[4] 刘晶淼,王纪军,丁裕国. 计算非均匀地表通量的一种简化 PDF 及其应用[J]. 高原气象,2002,21(6):583-590.

[5] 王开存,周秀骥,刘晶淼. 复杂地形对计算地表太阳短波辐射的影响[J]. 大气科学,2004,28(4):625-633.

[6] PAUL A B, HARRY J M, PETER M L, et al. A comparison of the mosaic and aggregated canopy frameworks for representing surface heterogeneity in the Canadian boreal forest using CLASS: a soil perspective [J]. Journal of Hydrology, 2002, 266: 15-39.

[7] Dipartimento nuove tecnologie instito techico indestriale. GTOPO30 topography on-line map construction tool [EB/OL]. [2004-11-17]. http://www.itis-molinari.mi.it/Gtopo30.htm.

[8] ORNL distributed active archive center. BOREAS Project/Campaign Document [EB/OL]. [2004-11-17]. http://www.daac.ornl.gov/BOREAS/boreas_campaign.html.

[9] 张海兴,张建奇,白长城,等. 含潜热能量的地表热平衡方程与统计解[J]. 红外与毫米波学报,1996,15(3):169-173.