

# 一种顾及表面间多次散射的热辐射方向性模型

赵利民<sup>1,2</sup>, 顾行发<sup>1,2\*</sup>, 余涛<sup>1,2</sup>, 万玮<sup>3</sup>, 张伦<sup>1,2</sup>, 谢燕华<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院遥感应用研究所 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

2. 国家航天局航天遥感论证中心, 北京 100101;

3. 北京大学 遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871)

**摘要:**利用辐射换热角系数描述了非同温异质表面间的多次散射效应, 据此建立热辐射方向性模型, 并对模型的数值计算进行了讨论. 将模型应用于行结构目标, 结合孔隙率模型模拟其方向亮温(Directional Brightness Temperature, DBT)变化规律. 结果表明, 模拟得到的规律与地面观测结果具有较高的一致性, 平均偏差在 0.5 K 以内. 同时发现, 多次散射效应增强了目标 DBT, 但对 DBT 的变化幅度又起平滑作用; 目标组分的温差、几何结构、发射率均可导致 DBT 发生变化, 温差越大, 表面越凹, 发射率越小, DBT 随观测角度变化的程度越剧烈; 模型可以解释热辐射中的“热点效应”, 认为“热点”的产生主要与组分温度空间分布有关. 模型对于研究发射率方向性, 城市热红外遥感反演及热红外邻近像元影响等问题可提供参考或思路.

**关键词:**热辐射方向性; 多次散射; 角系数; 行结构; 热点效应

**中图分类号:**TP722.5 **文献标识码:**A

## A directional thermal radiance model for multiple scattering over surfaces

ZHAO Li-Min<sup>1,2</sup>, GU Xing-Fa<sup>1,2\*</sup>, YU Tao<sup>1,2</sup>, WAN Wei<sup>3</sup>, ZHANG Lun<sup>1,2</sup>, XIE Yan-Hua<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. The Center for National Spaceborne Demonstration, Beijing 100101, China;

3. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** The multiple scattering effect between heterogeneous non-isothermal surfaces is described rigorously using the configuration factor in engineering thermophysics. Based on the results a directional thermal radiance model is built, and the numerical calculation of the model is discussed. The model is integrated with the gap probability model and applied to a row structure to simulate the change of Directional Brightness Temperature (DBT). The results show that the modeled DBT agrees well with the observed DBT, especially under the condition that the gap probability is very low. It is also shows that the DBT is aggrandized because of the multiple scattering effects, whereas the change of DBT tend to average out. The temperature difference, spatial distribution, emissivity of the components can all lead to the change of DBT. That is to say, the higher of the temperature difference, the craggier of the surface and the lower of the emissivity, the more exquisite DBT changes along with the viewing zenith. The model developed in this paper can explain "hot spot effect" of thermal radiance, and it is confirmed that the existence of "hot spot" is mainly related to the spatial distribution of components' temperature. This model can be used for the study of directional effect on emissivity, the LST retrieval over urban areas and the adjacency effect of thermal remote sensing pixels.

**Key words:** directional thermal radiance; multiple scattering; configuration factor; row structure, hot spot effect

**PACS:** 78.20. Bh, 78.20. Ci, 44.05. + e

收稿日期:2011-10-17, 修回日期:2012-02-27

Received date: 2011-10-17, revised date: 2012-02-27

基金项目:“十二五”民用航天技术预先研项目;“十一五”民用航天技术预先研项目;科技部国际科技合作计划项目(2010DFA21880)

**Foundation items:** Supported by the 12th and the 11th five-year plan of civil aerospace technology advanced research projects, and the China international science and technology cooperation program project(2010DFA21880)

**作者简介 (Biography):** 赵利民(1982-), 男, 甘肃陇西人, 博士, 助理研究员, 研究方向为热红外遥感信息模型的理论 and 应用. E-mail: zhaolm@irsa.ac.cn.

\*通讯作者 (Corresponding author): E-mail: xfgu@irsa.ac.cn.

## 引言

热辐射方向性是当前热红外遥感的核心问题之一<sup>[1]</sup>. 对于同温匀质表面, 辐射方向性问题主要取决于比辐射率方向性<sup>[2]</sup>, 它与物体物理属性和表面粗糙度有关, 这一现象在许多野外或实验室观测中得到证明<sup>[3-6]</sup>; 对于非同温异质表面, 除了比辐射率因素外, 一般还认为组分温差, 几何结构也可导致辐射亮度随观测角度发生变化<sup>[7-10]</sup>. 为揭示热辐射的方向性规律, 人们建立了多种热红外遥感信息模型. Kimes<sup>[11]</sup>在上世纪 80 年代初建立了行结构箱体几何光学模型, 考虑了各组分视在比例的变化; 陈良富等<sup>[12]</sup>考虑了孔隙率和组分几何结构的影响, 建立了冠层无散射模型, 并用实验证明该模型比 Kimes 模型更接近实际观测值; 余涛等<sup>[13]</sup>综合考虑了目标孔隙率, 太阳-目标-传感器空间关系和组分几何, 辐射特性, 建立了行结构方向亮温模型, 成功解释了热辐射的热点效应; François<sup>[6]</sup>等人在孔隙率模型的基础上通过对冠层分层来表达多次散射的影响, 但较难应用于实际.

在热辐射方向性规律的研究中, 组分间多次散射的问题较难确定, 定量的描述仍然缺乏<sup>[14-16]</sup>. 在很多建模分析中, 要么将多次散射忽略, 要么用误差增量或随机过程的方式加以描述, 很少对其做解析的表达. 由于组分温度与环境温度同处一个数量级, 组分与环境, 组分与组分之间互为辐射源, 所以在热红外遥感信息模型研究中须重视多次散射的作用<sup>[17]</sup>. 本文从工程热物理中的辐射换热思想出发, 通过引入辐射换热角系数, 建立一个非同温开放目标的热辐射方向性模型, 尝试定量地描述非同温组分之间以及组分与环境间多次散射的影响, 为热辐射方向性规律的探讨提供一种思路.

## 1 原理与方法

### 1.1 理论背景

自然条件下很少存在表面均匀平坦的目标, 尺度效应的存在使得研究目标热辐射时不能对其直接应用相关物理定律, 但从工程上讲, 总可以将空间目标分解为  $m$  个同温均匀漫射表面(极限情况为微元面). 假设表面间大气匀质, 等温且无湍流, 局地能量平衡条件下, 表面  $k$  上单位面积的有效辐射  $Me_k$  是其自身辐射与反射的入射辐射之和, 即

$$Me_k(\lambda, T_k) = \varepsilon_k(\lambda)B(\lambda, T_k) + [1 - \varepsilon_k(\lambda)]E_k, \quad (1)$$

式中,  $\lambda$  为电磁辐射波长(单位:  $\mu\text{m}$ );  $T_k$  为表面  $k$

的热力学温度(单位: K);  $\varepsilon_k(\lambda)$  为表面的光谱发射率(下文中简称为  $\varepsilon_k$ );  $B(\lambda, T_k)$  为与表面  $k$  同温的黑体辐射出射度(单位:  $\text{W}/\text{m}^2$ , 下文中简称为  $B_k$ );  $E_k$  为外界对表面  $k$  的辐射入射度 ( $\text{W}/\text{m}^2$ ). 对于热红外遥感而言, 表面  $k$  的辐射入射度  $E_k$  可分为两部分: 天空背景辐射  $E_k^{\text{air}}$  和包含表面间多次散射环境投射辐射  $E_k^{\text{envi}}$ . 天空背景辐射  $E_k^{\text{air}}$  主要指大气和云的下行辐射, 一般依据近地层气温, 湿度, 云量等常规气象观测资料建立的经验关系模型来计算<sup>[18]</sup>, 也可利用诸如 MODTRAN 等大气辐射传输模拟软件计算. 本文重点讨论环境投射辐射  $E_k^{\text{envi}}$  的计算.

### 1.2 环境辐射与目标有效辐射

环境辐射  $E_k^{\text{envi}}$  是目标各表面的有效辐射穿过介质(通常为表面间的大气)投射到表面  $k$  上的辐照度. 能量穿过介质时, 部分被吸收, 进而又增加介质的辐射, 因此计算  $E_k^{\text{envi}}$  时, 需要同时考虑介质对其它表面投射辐射的衰减和介质自身对表面的直接辐射. 在表面  $i$  上取微面元  $dA_i$ , 表面  $k$  上取微面元  $dA_k$ , 其中心连线长为  $r$ , 连线与两微面元法线夹角分别为  $\theta_1$  和  $\theta_2$ , 引入可视因子  $dF_{di-dk}$ , 定义为表面  $dA_i$  投射到表面  $dA_k$  上的辐射通量占微面  $dA_i$  辐射通量的比例, 有  $dF_{di-dk} = \cos\theta_1 \cos\theta_2 dA_k / \pi r^2$ , 则微面  $dA_i$  对微面  $dA_k$  的辐照度为

$$E_{di-dk}^{\text{envi}} = \frac{Me_i \tau(\lambda, r) + B_{\text{air}} \alpha(\lambda, r) dF_{di-dk} dA_i}{dA_k}, \quad (2)$$

式中  $\tau(\lambda, r)$  和  $\alpha(\lambda, r)$  分别是光路长度为  $r$  的大气光谱透射率和吸收率,  $\tau(\lambda, r) = e^{-\kappa r}$ ,  $\alpha(\lambda, r) = 1 - \tau(\lambda, r)$ ,  $\kappa$  为消光系数;  $B_{\text{air}}$  为表面附近的大气光谱黑体辐射出射度. 假设目标各表面均匀且为漫射表面, 对  $dA_i, dA_k$  积分, 得到表面  $i$  投射到表面  $k$  上的辐射通量为:

$$\begin{aligned} A_k E_{i-k}^{\text{envi}} &= \int_{A_i} \int_{A_k} [Me_i \tau(\lambda, r) + B_{\text{air}} \alpha(\lambda, r)] dF_{di-dk} dA_i dA_k \\ &= Me_i \int_{A_i} \int_{A_k} \tau(\lambda, r) \frac{\cos\theta_i \cos\theta_k}{\pi r^2} dA_i dA_k \\ &\quad + B_{\text{air}} \int_{A_i} \int_{A_k} \alpha(\lambda, r) \frac{\cos\theta_i \cos\theta_k}{\pi r^2} dA_i dA_k, \end{aligned} \quad (3)$$

$k$  面接收到的环境辐射能量  $A_k E_k^{\text{envi}}$  是各面到  $k$  面的辐射通量之和, 即

$$A_k E_k^{\text{envi}} = \sum_{i=1}^m A_k E_{i-k}^{\text{envi}}, \quad (4)$$

从而表面  $k$  上得到的外界入射辐射为

$$E_k = E_k^{\text{air}} + \sum_{i=1}^m E_{i-k}^{\text{envi}}. \quad (5)$$

表面  $k$  在视线方向上的等效辐射通量可表示为

$$\begin{aligned} \Phi e_k &= [\varepsilon_k B_k + (1 - \varepsilon_k) E_k] A_k f(\alpha_v, \varphi_v, \beta_k, \varphi_k) \\ &= M e_k a_k, \end{aligned} \quad (6)$$

式中  $f(\alpha_v, \varphi_v, \beta_k, \varphi_k)$  为表面  $k$  在视线方向上的投影函数,  $\alpha_v, \varphi_v, \beta_k, \varphi_k$  分别为观测天顶角、方位角, 坡度和坡向.

由(6)式, 空间目标在视线方向的有效辐射出射度可表示为:

$$M = \sum_{i=1}^m M e_i a_i / \sum_{i=1}^m a_i. \quad (7)$$

上式即为非同温异质空间目标的有效辐射模型. 这里总的有效辐射包含了目标各表面间以及表面与介质间多次散射的影响, 考虑了组分材质, 温度, 几何结构以及组分间介质的综合影响, 式(5)~(7)解析地描述了非同温混合目标的热辐射方向性规律.

### 1.3 模型简化与求解

若不考虑各表面间介质的消光与辐射, 式(3)可简化为

$$A_k E_{i-k}^{\text{envi}} = M e_i A_i F_{i-k}, \quad (8)$$

式中  $F_{i-k} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_k} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_k}{\pi r^2} dA_i dA_k$ , 定义为表面  $i$  对表面  $k$  的可视因子, 在辐射换热中也称为角系数<sup>[19]</sup>. 利用角系数性质, 结合式(5), 有

$$E_k = E_k^{\text{air}} + \sum_{i=1}^m M e_i F_{k-i}. \quad (9)$$

将式(9)代入式(1), 得到表面  $A_k$  的有效辐射出射度  $M e_k$ , 即

$$M e_k = \varepsilon_k B_k + (1 - \varepsilon_k) \left( E_k^{\text{air}} + \sum_{i=1}^m M e_i F_{k-i} \right). \quad (10)$$

表面间角系数仅与表面形状大小和相对空间关系有关, 一些常用的表面间角系数表达式可查表获得. 若知道各表面形状大小, 空间方位, 发射率, 太阳-目标几何光照以及大气条件, 则式(10)为包含  $m$  个未知数的  $m$  维方程组, 此时方程组可解. 对遥感应用而言, 场景一般由大量表面构成, 规模过于庞大的方程组解算会降低模型的应用效率, 需考虑将式(10)简化. 首先将式(10)展开为如下形式:

$$\begin{aligned} M e_k &= \varepsilon_k B_k + (1 - \varepsilon_k) \left( E_k^{\text{air}} + \sum_{i=1}^m \varepsilon_i B_i F_{k-i} \right) + (1 - \\ &\varepsilon_k) \sum_{i=1}^m (1 - \varepsilon_i) F_{k-i} \left( E_k^{\text{air}} + \sum_{j=1}^m M e_j F_{i-j} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

在 8 ~ 14  $\mu\text{m}$  热红外大气窗口, 多数地物表面

(如裸土, 植被, 水体, 居民地等)法向发射率大于 0.95<sup>[1]</sup>, 且随波长变化较小. 对所有表面发射率取 0.95, 式(11)右端第三项变为

$$\Delta = \frac{1}{400} \sum_{i=1}^m F_{k-i} \left( E_k^{\text{air}} + \sum_{j=1}^m M e_j F_{i-j} \right). \quad (12)$$

自然条件下, 地表各处的热红外辐射和天空背景辐射分别处于相同数量级. 假设对于表面  $i$ , 取  $E_i^{\text{air}} = E^{\text{air}}, M e_i = M e$ . 对于开放空间, 由角系数性质知一个表面对其它表面的角系数之和不大于 1, 因此有

$$\Delta < \Delta_i = \frac{1}{400} \left[ E^{\text{air}} + M e \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m F_{i-j} \right]. \quad (13)$$

由定义知  $F_{i-j}$  随两表面夹角的增大而减小. 在自然条件下, 两个可视表面的夹角很少小于  $90^\circ$ , 取极端情况, 将  $m$  个相互可视的表面整合到两个共边且相互垂直的表面  $x, y$  上, 结合角系数性质, 有

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m F_{i-j} \leq F_{x-y} + F_{y-x} < 2, \quad (14)$$

因此有

$$\Delta < \Delta_i = \frac{1}{400} \left[ E^{\text{air}} + 2 M e \right]. \quad (15)$$

与式(11)右端第一, 二项相比,  $\Delta$  可视为微小量, 从而有

$$M e_k \approx \varepsilon_k B_k + (1 - \varepsilon_k) \left( E_k^{\text{air}} + \sum_{i=1}^m \varepsilon_i B_i F_{k-i} \right). \quad (16)$$

令  $E_k^{\text{scat}} = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i B_i F_{k-i}, E_k^{\text{scat}}$  即可视为表面  $k$  与其它表面之间多次散射引起的人射辐射增量. 利用式(16)计算各表面有效辐射出射度, 将结果代入式(7), 便可得到不考虑组分间介质(一般为大气)影响的目标方向辐射出射度.

## 2 模型应用

方向亮温 (Directional Brightness Temperature, DBT) 是被遥感器直接获得的参数. 一些研究和观测实验已经发现, 对于行结构目标, DBT 的大小依赖于目标组分温度分布, 组分几何结构以及太阳-目标-传感器的空间方位关系, 存在所谓的“热点效应”<sup>[7, 9, 10, 13]</sup>. 为与前人的研究进行对比, 本文仍采用经典的行结构目标, 但组分分解更为详细. 首先利用式(7)和式(16)计算目标的等效辐射, 再由 Stefan-Boltzmann 定律计算目标 DBT, 在此基础上对目标的辐射方向性规律进行研究.

### 2.1 行结构目标描述

图 1 为行结构以及太阳-目标-传感器几何关系的简化表达. 在这个体系中, 行体为垂直纸面方向具有无限长度的实心体, 光线不可穿透, 其底部紧贴地面;  $a$  为行体宽度,  $h$  为行高,  $L$  为行间距,  $\alpha_s$  为太阳天顶角,  $\alpha_v$  为观测天顶角. 假设体系为对称结构, 则  $\alpha_s$  可限制在  $0 \sim \pi/2$ , 而  $\alpha_v$  在  $-\pi/2 \sim \pi/2$  之间变化. 如视线与光线在箱体同一侧, 则  $\alpha_v > 0$ , 否则  $\alpha_v < 0$ .

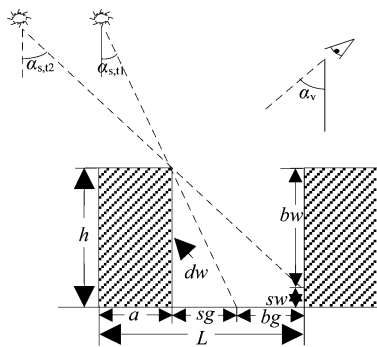


图 1 行结构目标垂直截面示意图  
Fig. 1 Cross section of target with row structure

### 2.2 模拟初始输入参数

对于类似图 1 组分表面为漫射的目标, DBT 主要受观测天顶角、组分的几何结构及热力学属性等因素控制. 为考察 DBT 变化规律, 不失一般性, 令太阳、行截面与传感器位于同一主平面内, 地理位置和季节确定,  $T_a, T_w, T_g, T_{sw}, T_{sg}$  分别为某时刻行顶, 行壁光照面, 地面光照面, 行壁阴影面和地面阴影面的温度;  $\epsilon_a, \epsilon_w, \epsilon_g$  分别为行顶, 行壁和地面的发射率. 利用式 (16) 和式 (7) 计算目标方向辐射, 其中, 式 (16) 中天空背景辐射  $E_k^{air}$  的计算较为复杂, 且对热辐射方向性的贡献为微小量, 为简便计算, 本文取  $E^{air} = 0$ . 依据典型箱形建筑物的比例及材质属性, 拟定计算所需输入参数, 如表 1 所示.

表 1 行结构 DBT 模拟计算初始输入参数  
Table 1 Initial input parameters for simulating the DBT of row box

$\alpha_s$	$a$	$h$	$L$	$\epsilon_a$	$\epsilon_w$	$\epsilon_g$	$T_a$	$T_w$	$T_g$	$T_{sw}$	$T_{sg}$
15.0	0.3	0.5	1.0	0.975	0.96	0.95	310.0	308.0	320.0	302.0	305.0

## 3 模型计算结果与验证

### 3.1 与经典模型的对比

本文设定的行结构目标不透光, 因此在模型分

析中暂不考虑孔隙度的影响. 这样 Kimes<sup>[11]</sup>, 陈良富<sup>[10]</sup>, Yu<sup>[13]</sup> 等人的 DBT 模型可表述为  $T_B^A = \sum_{i=1}^m f_i \epsilon_i T_i^A$ , 其中  $f_i$  为组分  $i$  在视场中的面积比例; 而依据本文提出的模型, DBT 可表述为  $T_B^A = \sum_{i=1}^m f_i [\epsilon_i T_i^A + (1 + \epsilon_i) \sum_{j=1}^m \epsilon_j T_j^A F_{i-j}]$ . 结合表 1 中的参量, 分别利用两种模型计算行结构的 DBT, 图 2 说明了两种 DBT 模型的异同: DBT 随视角的变化具有相似的规律, 但变化速率和大小存在差异. Kimes 等人的模型未考虑组分间多次散射产生的辐射增量, 因此 DBT 在数值上低于本文模型的结果; 针对本文目标结构中, 由式 (9) 知低温组分 (行壁背光面) 比高温组分 (地面光照面) 接收到更强的散射辐射, 而两者反射率接近, 因此前者反射的散射辐射也更多, 由多次散射导致的 DBT 极大值增量大于极大值的增量, DBT 值域相对缩小, 因此多次散射效应一定程度上对 DBT 的变化产生 "平滑" 作用.

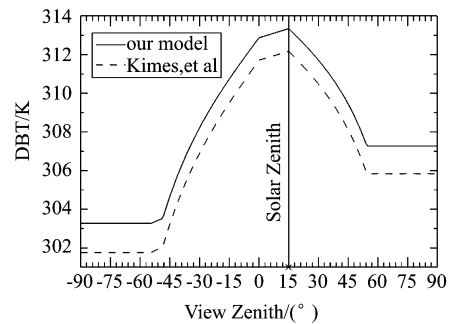


图 2 本文模型 DBT 与 Kimes 等<sup>[11]</sup>模型结果的对比  
Fig. 2 Comparison of the modeled DBTs using Kimes<sup>[11]</sup> and our model

### 3.2 模型结果验证

陈良富等于 2001 年 3 月 29 日至 5 月 20 日在北京顺义遥感试验区对行播小麦不同生长期的热辐射方向性进行了地面观测<sup>[10]</sup>, 冬小麦行播结构类似于图 1 描述, 其中行顶、行壁同为植被组分. 取文献 [10] 中 2001 年 4 月 11 日 10:30 左右和 5 月 10 日 14h 的冬小麦 DBT 观测结果作为模型验证数据, 模型输入参数测量值如表 2 所示, 其中 4 月 11 日 10:30 观测方位位于垄行主平面, 太阳方位角和垄向夹角大约为 30°; 5 月 10 日 14h 的观测方位位于太阳主平面内, 太阳方位角和垄向夹角大约为 24°. 对于作物而言, 由于叶片间存在孔隙, 部分光线能够穿透垄行, 导致遥感视场中各组分比例还受孔隙

率的影响. 关于行播作物孔隙率模型的论述与验证可见陈良富<sup>[10]</sup>, 阎广建<sup>[9]</sup>及余涛<sup>[13]</sup>等人的工作. 为便于对比, 各组分比例采用文献[10]孔隙率模型的计算结果. 随着地球表层的能量交换, 植被冠层的温度还受风速、气温、湿度等因素的影响, 然而在文献[10]观测实验中, 每个方位角度观测只用了 1 min 时间, 各组分温度具有相对的稳定性, 因此行播冬小麦 DBT 的模拟暂未考虑近地表气象因素.

表 2 行播冬小麦 DBT 模拟验证输入参数<sup>[10]</sup>

Table 2 Input parameters for simulating and validating the DBTs of row winter wheat

	LAI	$\alpha_s$	$a$	$h$	$L$	$\varepsilon_w$	$\varepsilon_g$	$T_w$	$T_g$	$T_{sw}$	$T_{sg}$
4月11	1.5	34.5	7	14	15	0.98	0.971	289.0	292.4	-	288.1
5月10	4.2	35.1	13	62	30	0.98	0.971	297.2	302.5	-	299.2

直接利用式(16)计算表面有效辐射时, 将作物垄行视作箱体无孔隙, 这相当于增加了散射面, 需要对式(16)进行修正. 垄行组分间的散射主要发生在垄壁与地面之间, 将垄壁理解为带"孔"平面, 其有效散射面是垄壁面积与孔隙率的函数. 由于孔隙率具有方向性, 因此行壁组分为非漫射表面, 组分间角系数不能用代数法计算, 利用式(16)计算表面有效辐射时将会出现很复杂的耦合的积分方程组, 可用有限元法处理这类问题. 本文将行壁做一元处理, 即视其为漫射表面, 用 $[0, \pi/2]$ 的平均孔隙率来代表垄壁各个方向的孔隙率, 则组分  $k$  的有效散射面为  $A_k(1-P_k)$ , 其中  $P_k$  为表面  $k$  的孔隙率. 从而将表面  $k$  的有效辐射修正为

$$Me_k \approx \varepsilon_k B_k + (1 - P_k)(1 - \varepsilon_k)(E_k^{\text{air}} + \sum_{i=1}^m (1 - P_i)\varepsilon_i B_i F_{k-i}). \quad (17)$$

根据文献[10]孔隙率计算的结果, 统计得到 4 月 11 日和 5 月 10 日植被平均孔隙率分别为 0.659 和 0.337. 由于植被光照面和阴影面的温差不可忽略, 本文模型将植被组分细化, 利用观测值推算植被光照面和阴影面的组分比例和温度. 考虑冬小麦垄行结构特性, 当垄向与观测方位角垂直或夹角较大时, 在大观测天顶角 ( $|\text{View Zenith}| \geq 55^\circ$ ) 下, 视场内的占主导地位的植被组分要么为植被光照面, 要么植被阴影面, 这类情况下只要测得土壤光照面和阴影面的温度、组分比例以及 DBT, 即推算出植被组分的温度. 从文献[10]中读取大观测天顶角 ( $|\text{View Zenith}| = 55^\circ \sim 60^\circ$ ) 时各组分比例  $f$  以及 DBT 观测值, 结合表 2 中土壤组分的测量值, 推算得到 4 月 11 日植被光照面和阴影面的平均温度分

别为  $T_w = 289.8 \text{ K}$ ,  $T_{sw} = 286.7 \text{ K}$ ; 5 月 10 日植被光照面和阴影面的平均温度分别为  $T_w = 298.5 \text{ K}$ ,  $T_{sw} = 297.4 \text{ K}$ . 将表 2 用上述推算结果更新, 代入由式(17)修正过的 DBT 模型, 得到模拟值, 与对应地面观测结果相对比, 如图 3 所示.

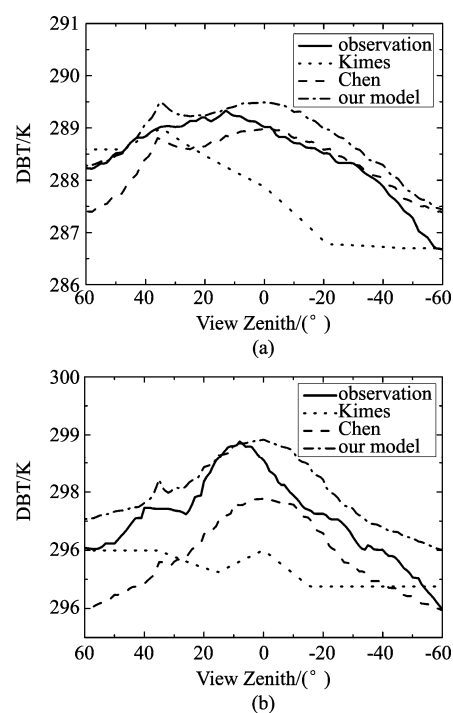


图 3 DBT 模型模拟值与观测值对比, 其中 (a) 和 (b) 中的 DBT 实测值引自文献[10]的观测数据

Fig. 3 Comparison between the modeled and measured DBTs, the measured values in (a) & (b) were cited from Ref. [10]

结果显示本文模型值较接近于实测值, 两次实验平均偏差均在 0.5 K 以内. 从图 3 可以看出, 多次散射对目标 DBT 的贡献近似于一个线性的增量, 在不考虑这个增量的前提下, 将目标组分细化, 可使 DBT 的模拟值更接近于实际规律; 组分细分后的 Kimes 模型在一定程度上也能体现 DBT 变化趋势; 孔隙率模型 (Chen 模型) 由于未考虑多次散射因素, 因此其模型值较实测值整体偏低, 当孔隙率较大时低估较弱, 如图 3(a) 所示, 而当孔隙率较小时对 DBT 的低估比较明显, 如图 3(b) 所示; 同时考虑组分细分, 孔隙率和多次散射因素后, 本文模型 DBT 模拟值与实际规律更为一致.

## 4 模型影响因素分析

### 4.1 组分几何结构的影响

#### (a) 行顶宽度的影响

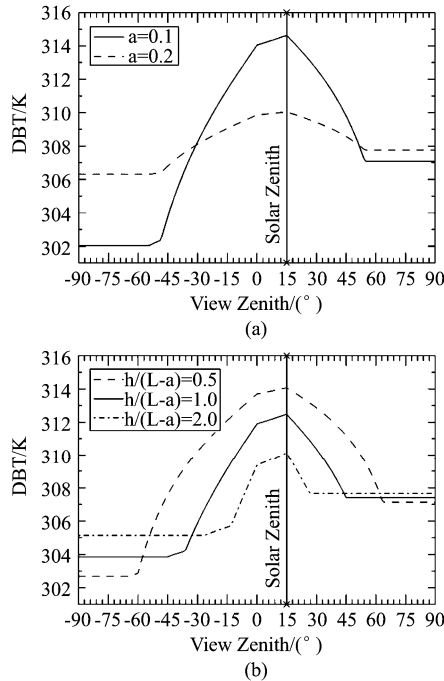


图4 组分几何结构对模型模拟所得 DBT 的影响 (a) 行顶宽度  $a$ , (b) 行高-宽比例  $h/(L-a)$   
 Fig. 4 The dependence of DBTs on the structure of the components (a) variation with the width of the row, (b) variation with the ratio of row's height to width

对表 1 中行顶宽度参数  $a$  进行调整, 分析其变化对 DBT 的影响. 行顶宽度决定了视场中地面组分的比例. 行顶越宽, 地面和行壁组分比例越小, 对应地温度极值组分对 DBT 的贡献越小, 因此 DBT 随视角的变化更为平缓, 热点处的 DBT 值也随之降低, 如图 4(a) 中虚线所示; 行顶若变窄, 则视场内行壁, 地面这些温差较大组分的比例将增加, 因而 DBT 的随视角的变化更为剧烈, 且热点处的 DBT 更接组分亮温之极高值.

(b) 行高-行距比的影响

行高-宽比  $h/(L-a)$  决定了某时刻视场中地面光照面的比例. 结合表 1 参数, 用不同的高宽比值来模拟地面光照面变化对 DBT 的影响, 如图 4(b) 所示. 高宽比越大, 地面组分比例将越小, 地面热辐射对目标 DBT 的贡献也越小, 可看到地面组分的视角范围也将减小. 如 3.1 节所述, 行壁和行顶在视场中的比例为定值, DBT 变化主要源于视场内地面比例的改变, 因此 DBT 将在较小的视角范围内产生变化, 而后归于稳定; 同时, DBT 的大小更多地受行顶, 行壁辐射所控制, 而行顶, 行壁向光面, 背光面温差较小, 因而 DBT 值域变窄, 多次散射导致的"平滑"作用变弱.

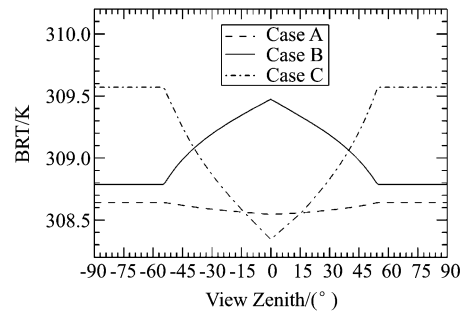


图5 组分发射率  $\epsilon$  对 DBT 分布的影响(假设各组分温度均为 310 K)  
 Fig. 5 The change of DBT versus components' emissivity in different cases (assuming all the components' temperature is 310 K)  
 Case A:  $\epsilon_a = 0.95, \epsilon_w = \epsilon_g = 0.99$ ; Case B:  $\epsilon_a = 0.99, \epsilon_w = 0.95, \epsilon_g = 0.99$ ; Case C:  $\epsilon_a = \epsilon_w = 0.99, \epsilon_g = 0.95$

4.2 组分发射率的影响

发射率不为 1 是导致表面间多次散射发生的根本原因. 将模型中各组分温度, 发射率都设为一致, 温度取值 310 K, 发射率取值 0.99. 为研究组分发射率对 DBT 造成的影响, 分别令行顶, 地面, 行壁发射率为 0.95, 其他参数与表 1 中的参数相同, 这三种情形 (Case A, Case B, Case C) 下 DBT 随视角变化规律如图 5 所示. 行顶组分未参与多次散射, 其发射率的变化对整个目标 DBT 变化规律的影响不大. 当参与多次散射组分的发射率, 温度均相同时, 根据 (16) 式, 组分辐照度仅与该组分到其他组分的角系数之和有关, 即  $E_k \propto F_k = \sum_{i=1}^m F_{k-i}$ , 对于本文行结构, 计算得到行壁组分各向角系数之和大于地面组分各向角系数之和, 因此行壁的辐照度略高于地面辐照度. 随着视角减小, 视场中有效辐射较低的地面组分比例增加, 从而导致 DBT 缓慢减小, 在观测天顶角为 0 时达到极小值, 如图 5 中 Case A 所示. 当行壁发射率为 0.95 时, 多次散射的存在使得各表面有效辐射增强, 进而增大了各表面的视在亮温, 这种增强的幅度与发射率成反比; 虽然行壁的亮温增强幅度较大, 但其亮温绝对值仍小于地面亮温, 因此视场中地面组分最大时"热点"出现, 如图 5 中 Case B 所示. 当地面发射率为 0.95 时, 地面组分亮温的增强幅度高于行壁组分的增强幅度, 但亮温绝对值小于行壁; 当视场中地面组分最大时"冷点"出现, 如图 5 中 Case C 所示. 总体而言, 当组分温度一致时, 多次散射平滑了 DBT 变化幅度, 当视场中高(低)发射率组分比例最大时热

(冷)点出现。

### 4.3 组分温度的影响

组分温度是影响 DBT 大小最主要的因素。分别模拟不同的组分温度分布, 研究组分温度对 DBT 变化规律的影响。第一种情形 (Case A), 令  $T_w = 315 \text{ K}$ ,  $\Delta t_w = T_w - T_{sw} = 0 \text{ K}$ ,  $\Delta t_g = T_g - T_{sg} = 3 \text{ K}$ , 其他参数与表 1 中的参数相同, 这时地面光照面的有效辐亮度最大, 地面阴影面组分有效辐亮度其次, 因此"热点"出现在视场中地面组分比例最大时, 即观测天顶角为  $0^\circ$ , 如图 6 中 Case A 所示; 第二中情形 (Case B), 令  $\Delta t_g = 7 \text{ K}$ , 其他参数与 Case A 相同, 这时地面光照面的有效辐亮度最大, 地面阴影面有效辐亮度最小, 因此"热点"出现在视场中地面光照面组分比例最大时, 即太阳照射方向, 同时当视场中地面阴影组分比例最大时, DBT 达到极低值, 由此产生一个"冷点", 如图 6 中 Case B 所示; 第三种情形 (Case C), 令  $T_w = 320 \text{ K}$ ,  $T_g = 315 \text{ K}$ ,  $\Delta t_w = 5 \text{ K}$ ,  $\Delta t_g = 0 \text{ K}$ , 其他参数与表 1 中的参数相同, 这时行壁光照面的有效辐亮度最大, 地面阴影面有效辐亮度最小, 当视场中行壁光照面组分比例最大时 DBT 达到最大值, 依据 3.1 节所述, 当视场中仅存行壁与行顶两组分时, 组分比例维持稳定, 因此 DBT 在达到最大值后不再随视角变化, 在这种情况下, "热点效应"消失, 仅存在"冷点效应", 即视场中地面阴影面组分比例最大是 DBT 达到极低值, 如图 6 中 Case C 所示。

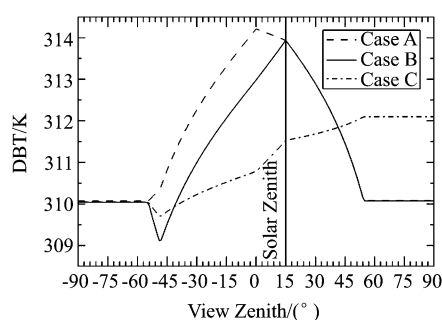


图 6 组分温度对 DBT 分布的影响

Fig. 6 The change of DBT due to the change of components' temperatures in different cases  
Case A:  $T_w = 315 \text{ K}$ ,  $\Delta t_w = 0 \text{ K}$ ,  $\Delta t_g = 3 \text{ K}$ ;  
Case B:  $T_w = 315 \text{ K}$ ,  $\Delta t_w = 7 \text{ K}$ ,  $\Delta t_g = 3 \text{ K}$ ;  
Case C:  $T_w = 320 \text{ K}$ ,  $T_g = 315 \text{ K}$ ,  $\Delta t_w = 5 \text{ K}$ ,  $\Delta t_g = 0 \text{ K}$

## 5 讨论

热辐射方向性研究中表面间多次散射的影响是

个不可忽略的因素, 在表面发射率较低的时候尤其需要注意, 例如城市建筑, 崎岖裸土, 裸露岩体等。一般认为辐射方向性主要由发射率方向性引起, 但不同地物的发射率的方向性强弱并不相同, 究其原因, 很可能与地物表面间多次散射的强弱有关。以粗糙沙土为例, 其颗粒表面微元可认为是朗伯体, 发射率无方向, 由于沙土颗粒表面组分间产生多次散射 (这种作用的强弱很可能和沙土粗糙度, 含水量, 沙土颗粒光照面与阴影面温差等因素有关), 增强了沙土颗粒整体的辐射方向性, 从而使得沙土像元的发射率产生较强的方向性。另外, 在城市热红外遥感定量研究方面, 本文模型对于城市区域组分温度的分离可提供帮助。理论上, 若已知目标亮温, 目标结构, 类型和组分分布, 能够反演出温度的组分数量仅与观测角度有关。本文模型讨论的是目标组分间的多次散射, 事实上该模型还可应用于热红外遥感影像邻近像元对目标像元的影响研究, 如将像元视做单一组分, 像元间的多次散射可通过像元大小, 空间相对关系, 发射率以及像元温度来计算, 但这时需要考虑计算的边界条件, 即需约束对目标像元产生影响的邻近像元范围, 可通过迭代计算来逼近真实值。

## 6 结论

为提高模型计算效率, 本文对模型做了一定的简化, 将简化后的模型应用于行结构目标体系, 模拟目标 DBT 变化规律, 分析了 DBT 变化的影响因素。同时将模型应用与行播冬小麦, 结合孔隙率模型模拟得到垄行作物方向亮温, 并与实测结果相对比, 得到如下结论:

(1) 对于垄行作物, 组分间多次散射对 DBT 的影响与叶面积指数正相关, 同时对组分的细化可使模拟得到的 DBT 变化规律与实际情况更为一致, 通过与孔隙率模型的结合, 本文模型可以更好地解释行作物 DBT 变化规律;

(2) 组分间多次散射效应增加了目标的 DBT, 增量与组分温差, 发射率以及组分几何结构有关, 温差越大, 发射率越低, 组分越"凹", 多次散射效应越明显, 导致的 DBT 增量也越大, 同时多次散射效应一定程度上也"平滑"了 DBT 随视角变化的幅度;

(3) 对于行结构目标, 行宽增加会减小 DBT 的变化幅度, 但不改变 DBT 变化规律; 行高-行距比的增加则不但减小 DBT 的变化幅度, 同时也使多

次散射对 DBT "平滑"作用变弱,也使 DBT 发生变化的视角范围变小;

(4) 即使在同温,同质,表面朗伯前提下,目标的 DBT 也有可能随视角发生变化,变化程度与组分几何结构和发射率大小有关,表面越"凹",发射率越小,散射作用越强,导致 DBT 随视角的变化幅度越大;在同温非同质情况下,表面间发射率差异越大, DBT 随视角的变化幅度越大;

(5) 目标 DBT "热点"出现的位置主要与组分温度的分布有关.一般当视场中高温组分比例达到最大时,将产生"热点效应",但高温组分比例达到最大后,有可能会与其他组分维持比例稳定,此时"热点效应"将会消失;同时由于对目标组分细分出现低温组分,导致 DBT 还可能存在"冷点效应",其产生规律与"热点效应"类似.

上述模拟研究中,为简化问题并未考虑大气下行辐射的影响,由于大气辐射并非各向同性,故对热辐射方向性的研究还需进一步深入.同时,对于类似于植被这样的不连续表面,有限元的划分、孔隙间多次散射的影响及验证还需进一步研究.

## 致谢

所用模型验证数据来自中国科学院遥感应用研究所陈良富研究员所做的行播冬小麦地面观测实验,审稿人提出建设性的修改意见,在此一并深表谢忱.

## REFERENCES

- [1] TIAN Guo-Liang. *Thermal infrared remote sensing* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry (田国良. *热红外遥感*. 北京: 电子工业出版社), 2006: 72 - 75.
- [2] CHEN Liang-Fu, FAN Wen-Jie, LIU Qin-Huo. The study on thermal infrared radiant directionality of non-isothermal land surface [J]. *Progress in Geography* (陈良富, 范闻捷, 柳钦火. 地表热辐射方向性研究进展. *地理科学进展*), 2001, **20**(3): 262 - 267.
- [3] Labed J and Stoll M P. Angular variation of land surface spectral emissivity in the thermal infrared; Labor investigation on bare soils [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1991, **12**(11): 2299 - 2310.
- [4] Rees W G, James S P. Angular variation of the infrared emissivity of ice and water surfaces [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, **13**(8): 2873 - 2886.
- [5] Cuenca J, Sobrino J A. Experimental measurements for studying angular and spectral variation of thermal infrared emissivity [J]. *Appl Opt*, 2004, **43**(23): 4598 - 4602.
- [6] François C, Ottlé C, Prévot L. Analytical parametrisation of canopy emissivity and directional radiance in the thermal infrared: Application on the retrieval of soil and foliage temperatures using two directional measurements [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, **18**(2): 2587 - 2621.
- [7] Kimes D S, Smith J A. Directional radiometric measurements of row-crop temperatures [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1983, **4**(2): 299 - 311.
- [8] Li X, Strahler A H, Friedl M A. A conceptual model for effective directional emissivity from non-isothermal surface [J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 1999, **37**(5): 2508 - 2517.
- [9] Yan G, Jiang L, Wang J, et al. Thermal bidirectional gap probability model for row crop canopies and validation [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2003, **46**(12): 1241 - 1249.
- [10] Chen L, Liu Q, Fan W, et al. A bi-directional gap model for simulating the directional thermal radiance of row crops [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2002, **45**(12): 1087 - 1098.
- [11] Kimes D S. Remote sensing of row crop structure and component temperatures using directional radiometric temperatures and inversion techniques [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1983, **13**(1): 33 - 55.
- [12] Chen L, Li Z, Liu Q, et al. Definition of component effective emissivity for heterogeneous and non-isothermal surfaces and its approximate calculation [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, **25**(1): 231 - 244.
- [13] Yu T, Gu X, Tian G, et al. Modeling directional brightness temperature over a maize canopy in row structure [J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2004, **42**(10): 2290 - 2304.
- [14] Sobrino J A, Jiménez-Munoz J C, Verhoef W. Canopy directional emissivity: Comparison between models [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **99**(3): 304 - 314.
- [15] Menenti M, Jia L, Li Z L. Multi-angular thermal infrared observations of terrestrial vegetation [M]. in *Advances in Land Remote Sensing: System, Modeling, Inversion and Application*, S. Liang, Ed., ed Berlin: Springer, 2008: 51 - 93.
- [16] CHENG Tian-Hai, GU Xing-Fa, YU Tao, et al. Effect of surface reflectances on the space-based vector radiative detection [J]. *Acta Physica Sinica* (程天海, 顾行发, 余涛, 等. 地表双向反射对天基矢量辐射探测的影响分析. *物理学报*), 2009, **58**(10): 7368 - 7375.
- [17] Chen L F, Zhuang J L, Xu X R, et al. The concept of effective emissivity of nonisothermal mixed pixel and its test [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, **45**(9): 788 - 795.
- [18] Iziomon M G, Mayer H, Matzarakis A. Downward atmospheric longwave irradiance under clear and cloudy skies: Measurement and parameterization [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2003, **65**(10): 1107 - 1116.
- [19] TAN He-Ping, XIA Xin-Lin, LIU Lin-Hua, et al. *Numerical solution of thermal radiation and transfer: Thermal radiation calculation* [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press (谈和平, 夏新林, 刘林华, 等. *红外辐射特性与传输的数值计算: 计算热辐射学*. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社), 2006: 43 - 44.