

文章编号: 1007-4619 (2003) 03-0161-07

作物冠层的热红外辐射传输模型

刘 强, 陈良富, 柳钦火, 肖 青

(中国科学院 遥感应用研究所遥感信息科学开放实验室, 北京 100101)

摘 要: 通过在辐射传输方程中添加热发射项的方式, 直接把一个常用的可见光波段的冠层模型——SAIL模型改造成热红外波段模型。该模型与 Hapke 公式相比能更准确地计算多种农作物冠层的热红外辐射特性, 并能方便地作为一个基础模块融合到其他更高层次的热红外辐射模型中去。

关键词: 辐射传输模型; 热红外遥感; 辐射方向性; 有效发射率

中图分类号: TP701 **文献标识码:** A

1 引 言

遥感观测的对象通常是包含多种组分的混合像元。像元光谱是由像元结构、各组分光谱、光照条件(或组分温度)和观测条件共同决定的。为了描述遥感信号与地表性质的关系, 人们建立各种地表模型, 其中可见光波段模型发展较早, 也最为成熟。虽然热红外波段辐射与可见光波段反射有很大区别, 人们仍然尝试把可见光波段的一些结果推广到热红外波段, 比如 Li-Strahler 的几何光学模型^[1] 就可以基本不加改变的推广到热红外波段; Hapke 推导的半无限浑浊介质的二向反射模型虽然初衷是用于可见光波段^[2], 但是通过利用基尔霍夫定理建立方向半球反照率与方向发射率的关系后, 也可以用来计算方向发射率^[3]。

热红外波段地表模型的核心问题是组分温度和发射率与像元温度和发射率的关系, 许多学者都从热辐射机理出发建立模型描述这一关系。例如 LSF 关于非同温混合像元发射率的概念模型^[3], 徐希孺等的有效发射率模型、矩阵表达式等^[4,5]。这些模型从概念上揭示了组分温度和温差的分布对像元热辐射的影响, 以及像元内各组分互为光源的特性, 真正从原理上阐明了地表热辐射方向性产生的机理。另一方面, 上述几个模型都不是封闭模型, 而是需要其它一些模型和算法作为底层的组件。

SAIL 模型是适用于农田作物冠层的最有代表性的辐射传输模型之一, 特点是在水平均匀的假设下考虑了冠层的垂直分层结构和叶倾角分布^[6]。本文在 SAIL 模型的辐射传输方程中添加热发射项, 从而把它推广成为热红外模型。这从一定意义上说是对可见光模型的改造; 另一方面, 本文的工作并不打算提出一个独立完善的模型, 而是把它作为更高层次的热红外模型的一个组件, 用于计算农作物冠层的组分有效发射率或热辐射的多次散射项, 能够比 Hapke 模型更精确、比蒙特卡罗模拟更简便。

2 单层植被的辐射传输方程

辐射传输模型的基础和核心是辐射传输方程。SAIL 模型是 Verhoef 在 SUIT 模型的基础上发展而来的^[6,7], 模型在太阳光入射方向和观测方向无关的假设下计算了光线沿这两个方向的传输, 并用上行辐射通量和下行辐射通量来近似计算冠层内部散射光的传输。作为可见光波段模型, 原 SAIL 模型以太阳直射光和天空散射光为光源, 辐射传输方程中只考虑了叶片对光线的散射和吸收作用(图 1)。

在短波红外和热红外波段, 太阳直射辐射减弱, 地表自身的热辐射能量增强, 甚至占主导地位。为了将模型推广到短波红外和热红外波段, 必须考虑叶片热发射对光线的增强作用, 因此我们在辐射传输方程中添加热发射项。对于单层植被, 辐射传输

收稿日期: 2001-12-24; 修订日期: 2002-04-16

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G200077900)资助。

作者简介: 刘强(1974—), 男, 1997年毕业于北京大学数学系, 现为中国科学院遥感应用研究所在读博士生, 主要从事热红外和多角度遥感的建模和反演研究, 已发表论文3篇。

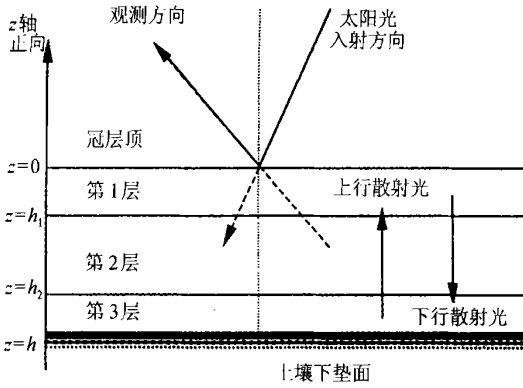


图 1 水平均匀植被辐射传输模型的示意图

Fig 1 An illustration for radiation transfer in horizontal homogeneous canopy

方程写为(为了简化符号,我们在公式中省略波长符号 λ):

$$\begin{aligned} dE_s/dz &= k_s E_s \\ dE_-/dz &= -\sigma E_+ + \alpha E_- - sE_s - r \\ dE_+/dz &= -\alpha E_+ + \sigma E_- + s'E_s + r \\ dE_o/dz &= wE_s + vE_- + uE_+ - k_o E_o + r_o \end{aligned} \quad (1)$$

其中, z 为高度,是微分方程的自变量,这里定义冠层顶高度为 0,向上为正方向,在冠层内部 z 取负值。 E_s 为太阳直射光通量, E_o 为观测方向的光线通量, E_+ 和 E_- 分别表示上行和下行散射光通量,单位为: $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$ 。 α 表示上行(或下行)散射光的削弱系数, σ 表示散射后上行光转化为下行光(或下行光转化为上行光)的比例, s 和 s' 分别表示太阳直射光转化为下行和上行散射光的比例, w, v, u 分别是太阳直射光、下行散射光、上行散射光向观测方向散射的比例, k_s, k_o 分别表示光线沿太阳入射方向和观测方向传播时的削弱系数(消光系数),它们的单位都是 m^{-1} 。以上这几个参数和原 SAIL 模型是完全一致的,其意义和估算方法在 Verhoef 的文章中有详细讨论^[9]。(1)式与可见光波段的辐射传输方程的区别在于增加了冠层自身热辐射项 r_o 和 r 。 r_o 为冠层自身热辐射对观测方向光线的增强, r 为冠层自身热辐射对上行和下行散射光的增强,我们的计算公式为:

$$\begin{aligned} r &= FAVD \cdot \epsilon \cdot M_b(T) \\ r_o &= FAVD \cdot F_o \cdot \epsilon \cdot M_b(T) \end{aligned}$$

其中, ϵ 为叶子发射率, T 为叶子温度, $M_b(T)$ 表示温度为 T 的黑体辐射度,单位是: $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$, $FAVD$ 是叶面积的体密度,单位是: m^{-1} ,对应于 Verhoef 文章中的 L' , F_o 为给定叶倾角分布下单位叶面

积在观测方向上的平均投影。分析 Verhoef 原文中削弱系数 k_o 的定义可知 $FAVD \cdot F_o = k_o$ 。

为了与原 SAIL 模型一致,也为了模型能用到中红外波段,我们在(1)式中保留了太阳直射辐射项。但因为在热红外波段太阳直射辐射很小,这一项实际上不起作用。另外,我们认为在短波红外和热红外波段叶片透过率为 0,发射率与反射率之和为 1,当然,这里隐含了叶片是朗伯体的假设。

为解微分方程组(1),我们分 3 步:首先我们得到太阳直射光通量 E_s 随高度的分布;

$$E_s(z) = E_s(0) e^{k_s z} \quad (2)$$

然后,我们求解上行和下行散射光通量 E_+ 和 E_- ,它们可写为如下形式:

$$\begin{aligned} E_+(z) &= A(1-f)e^{gz} + B(1+f)e^{-gz} + Ce^{k_s z} + D \\ E_-(z) &= A(1+f)e^{gz} + B(1-f)e^{-gz} + C'e^{k_s z} + D \end{aligned} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} D &= \frac{r}{\alpha - \sigma}; \\ C &= \frac{s'(k_s - \alpha) - s\sigma}{k_s^2 - g^2} E_s^{top}; \\ C' &= -\frac{s(k_s + \alpha) + s'\sigma}{k_s^2 - g^2} E_s^{top}; \\ g^2 &= \alpha^2 - \sigma^2; \\ f &= \frac{\alpha - \sigma}{g} \end{aligned}$$

另外两个系数 A, B 需要由根据上述微分方程的边界条件确定。若只考虑一层植被,边界条件有 2 个:

(i) 冠层顶的下行辐射通量等于大气下行辐射(天空光)通量,即: $E_-(0) = SKYL$;

(ii) 冠层底上行散射光通量为: $E_+(h) = [E_-(h) + E_s(h)] \cdot \rho_{soil} + \epsilon_{soil} M_b(T_{soil})$, 其中 $T_{soil}, \rho_{soil}, \epsilon_{soil}$ 分别为冠层底土壤温度、反射率、发射率, h 为冠层底高度, $h < 0$ 。

最后,我们计算传感器观测方向的光线通量 E_o 。在冠层下垫面, $E_o(h)$ 为:

$$E_o(h) = [E_-(h) + E_s(h)] \cdot \rho_{soil} + \epsilon_{soil} M_b(T_{soil}) \quad (4)$$

在冠层内部, $E_o(z)$ 可以写为:

$$E_o(x) = K_1 e^{-k_s z} + K_2 e^{k_s z} + K_3 e^{gz} + K_4 e^{-gz} + K_5 \quad (5)$$

其中:

$$K_2 = \frac{wE_s^{top} + uC + vC'}{k_o + k_s}$$

$$K_3 = \frac{A(u(1-f) + v(1+f))}{k_o + g}$$

$$K_4 = \frac{B(u(1+f) + v(1-f))}{k_o - g}$$

$$K_5 = \frac{(u+v)D + r_o}{k_o}$$

$$K_1 = \left(E_o(h) - K_5 - K_2 e^{\frac{kh}{s}} - K_3 e^{gh} - K_4 e^{-gh} \right) e^{k_o h}$$

3 多层植被的情况

实际情况,冠层中叶片密度和温度随高度变化有很大的差异,所以我们考虑将植被分为多个水平均匀层,每一层有不同的叶面积体密度、叶倾角分布和冠层温度。上述辐射传输方程可方便的推广到多层植被:对于每一层植被,仍使用与式(1)完全相同的方程形式,根据该层的叶面积体密度、叶倾角和温度计算式(1)中的常数系数,解微分方程的方法也基本不变。对应多层植被的情况,需要对微分方程的边界条件做适当修改,以保证相邻两层的各辐射通量在交界处连续;在冠层顶和下垫面的两个边界条件保持不变。

4 冠层结构对热辐射方向性的影响

我们用本模型讨论不同的冠层结构和温度分布对像元辐射方向性的影响。这一节中,我们设传感器波长为 9nm,叶片发射率取 0.966,土壤发射率取 0.938。

首先,我们模拟了不同叶倾角分布的水平、同温、无限厚冠层,图 2 给出辐射亮温随观测天顶角的变化。这里假设冠层温度是 20℃,无直射或天空散射光。小麦品种“9482”、“京 411”的叶倾角分布为 4 月 15 日于顺义第 1.4 号地测量所得,另外一条曲线为“京 411”考虑了茎的影响而修正了叶倾角分布。在图 1 中还给出了由 Hakpe 公式(文献[3])计算的方向热辐射。

注意到本模型中有两种方法可以计算同温像元方向热辐射:一是把太阳和天空辐射设为零,令冠层和土壤温度相同,直接计算冠层方向热辐射;二是令太阳直射光不为零,天空光为零,在模型中把冠层和土壤的发射项设为零,先计算像元的方向-半球反射率,再根据基尔霍夫定律可得方向发射率,可以间接计算冠层辐射。经过检验,这两种方法所得结果完全一样。

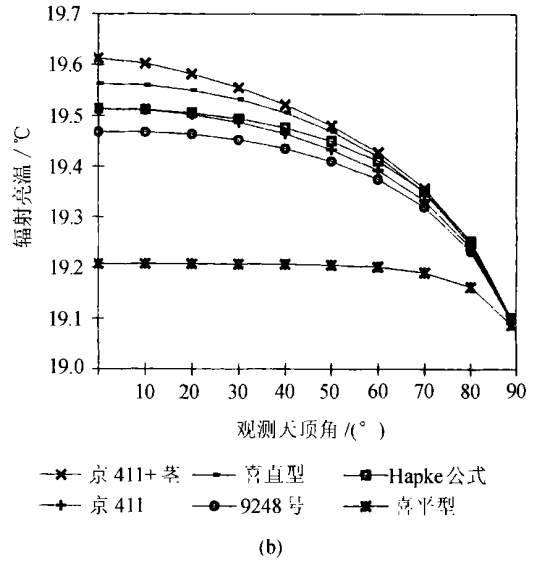
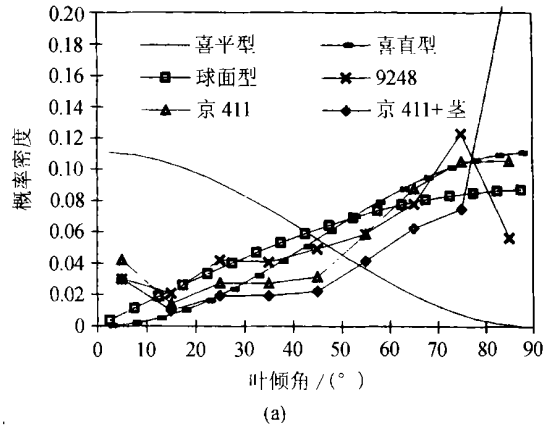


图 2 叶倾角分布对冠层方向热辐射的影响
(a) 典型叶倾角分布; (b) 几种典型叶倾角分布冠层的辐射方向性
Fig. 2 Angular variance of brightness temperature from canopy with different LAD

然后我们逐步讨论冠层温差的垂直分布和天空散射光对冠层热辐射方向性的影响。图 3 给出了在

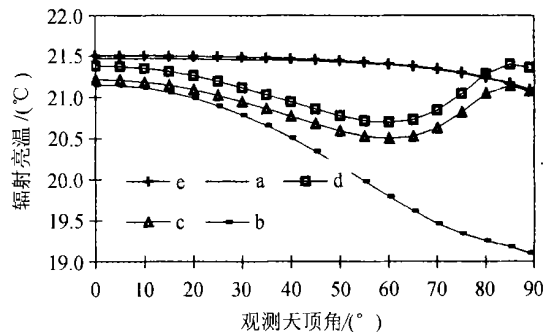


图 3 土壤温度、植被温度分层及天空散射光等因素对冠层热辐射方向性的影响
Fig. 3 Angular variance of brightness temperature from canopy with different vertical temperature distribution

几组典型参数设置下冠层热辐射的方向性。在这个例子中,我们假设冠层总叶面积指数为 2.5,叶倾角为喜直型分布,植被分为上下两层,上层叶面积指数 1,下层叶面积指数 1.5,下垫面为土壤。我们先模拟了叶片和土壤同温的情况,然后是叶片与土壤不同温、上下两层叶片也不同温的情况,最后讨论了天空散射辐射的影响。另外,作为对比,我们也给出了 Hapke 公式计算值,可见 Hapke 公式与同温冠层的辐射方向性比较接近。表 1 给出这 5 条曲线的模型参数设置描述。

表 1 图 3 的曲线所对应的模型参数 (单位: °C)

Table 1 Setting of parameters corresponding to Fig 3

| 编号 | 土壤温度 | 下层叶温度 | 上层叶温度 | 天空等效亮温 |
|-----|-------------------|-------|-------|--------|
| (a) | 22 | 22 | 22 | -273 |
| (b) | 25 | 20 | 20 | -273 |
| (c) | 25 | 18 | 22 | -273 |
| (d) | 25 | 18 | 22 | -30 |
| (e) | Hapke 公式(叶片温度 22) | | | |

5 计算组分有效发射率和多次散射

辐射传输模型的优点在于比较好的反映了多次散射对于总的冠层辐射的影响。缺点是在这个简单模型中所做的水平均匀的假设往往与实际情况不符。对于农作物冠层,即使其结构基本上是水平均匀的,但是由于太阳光照条件,冠层温度分布也会有明显的不均匀性。如前所述,在 LSF 的概念模型、陈良富等的有效发射率模型和徐希孺等热辐射特性的矩阵表达中,都从概念上把由结构和多次散射引起发射率增量与组分面积比及温差引起的辐射方向性分开考虑,并分别用不同的底层模型来计算这两部分。在这个思路下,我们将本模型用于计算由结构和多次散射引起发射率增量。

在有效发射率模型中^[4],混合像元的热辐射可表达为:

$$L(\theta) = \sum_i \epsilon_{ei}(\theta) L_b(T_i) \quad (6)$$

其中 $L(\theta)$ 为整个像元在 θ 方向的辐射亮度,单位是: $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot rad^{-1}$ 。下标 i 表示第 i 种组分, T_i 为第 i 种组分的温度, $L_b(T_i)$ 为温度为 T_i 的黑体辐射亮度, $\epsilon_{ei}(\theta)$ 表示第 i 种组分在 θ 方向的有效发

射率,包括了面积比例和多次散射两方面的因素。

$$\epsilon_{ei}(\theta) = a_i(\theta) \epsilon_i(\theta) + \Delta \epsilon_{is}(\theta) \quad (7)$$

$a_i(\theta)$ 为第 i 种组分在传感器视场中的面积比例, $\epsilon_i(\theta)$ 为第 i 种组分的发射率,可以在实验室条件下测量, $\Delta \epsilon_{is}(\theta)$ 为多次散射引起的组分有效发射率增量。

上述表达的优点在于组分有效发射率与温度无关,温度与波长无关;缺点在于 $\epsilon_{ei}(\theta)$ 这一项包括太多的内容,难以计算。原则上,只要知道像元的结构和组分发射率,就可以用真实结构模型或蒙特卡罗模拟计算组分有效发射率^[4,5,8]。但是真实结构模型或蒙特卡罗模拟都需要大量的计算,对于农作物这类植被,用辐射传输模型可以更为方便计算 $\epsilon_{ei}(\theta)$ 或 $\Delta \epsilon_{is}(\theta)$ 。因为温差是农作物冠层不满足水平均匀假定的最主要因素,而 $\epsilon_{ei}(\theta)$ 或 $\Delta \epsilon_{is}(\theta)$ 都与温差无关,所以本模型的水平均匀假定在这种用法中引起误差很小。

在本模型中,把太阳和天空辐射设为零,只保留一种像元组分温度为 T ,其余组分温度都设为零,即可求出该组分的有效发射,除以同温黑体像元的发射,可以得到组分有效发射率 $\epsilon_{ei}(\theta)$ 。从中减去直接发射部分,就是多次散射发射率增量 $\Delta \epsilon_{is}(\theta)$ 。图 4 给出典型小麦冠层各组分的多次散射发射率增量随观测角度的变化,波长为 9nm。图 5 给出典型小麦冠层各组分的多次散射发射率增量随波长的变化,观测角度为垂直向下。其中小麦叶片和土壤发射率波谱为实验测量值。

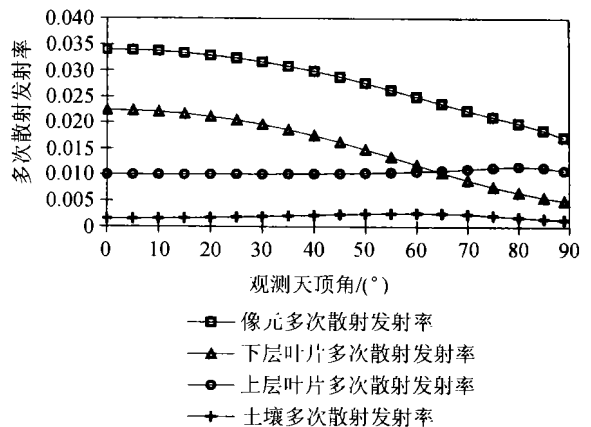


图 4 像元组分的多次散射发射率增量随观测角度的变化

Fig 4 Angular variance of multiscatter emissivity $\Delta \epsilon_{is}(\theta)$

of difference components

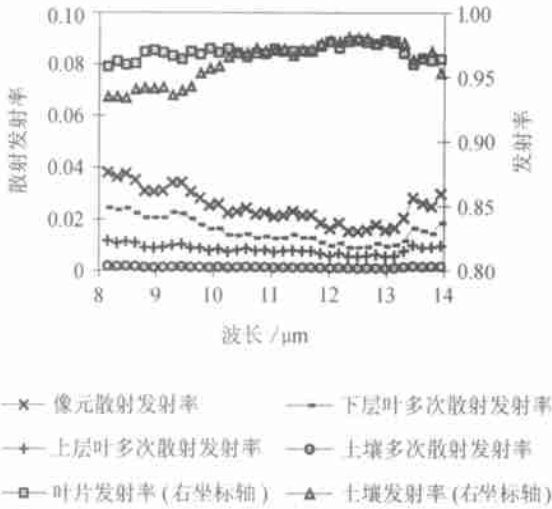


图 5 像元组分的多次散射发射率波谱
Fig 5 Spectral of multiscatter-emissivity $\Delta\epsilon_{is}(\theta)$ of difference components

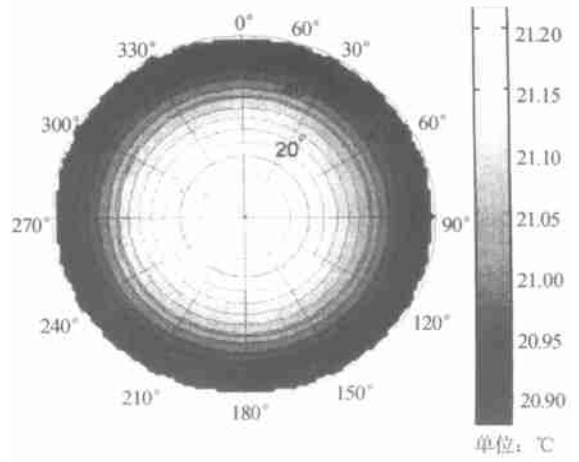


图 7 纯辐射传输模型模拟热辐射方向性
Fig 7 Simulation of brightness temperature of wheat canopy with extended SAIL model only

6 辐射传输模型与几何光学模型的混合使用

顺义实验中测量了冬小麦冠层方向热辐射以及配套的各种参数。图 6 给出 4 月 21 日上午的方向热辐射测量数据, 表 2 给出了模型参数的测量值。将模型参数的测量值代入本模型直接计算, 得到结果见图 7。可见测量值与模拟值还有比较明显的差别, 主要表现在: (1) 实测地表辐射亮温分布明显与观测方位角相关; (2) 实测地表辐射与太阳光线入射方向有一定相关; (3) 地表辐射的方向性差异比模拟

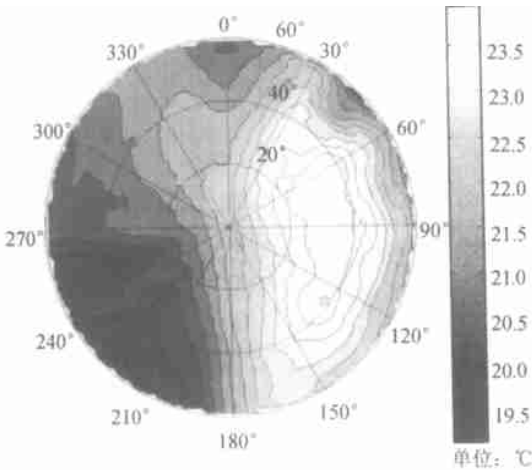


图 6 辐射计测量热辐射方向性(时间: 4 月 21 日上午 10 点)

Fig 6 Measured angular distribution of brightness temperature of wheat canopy in 10 o'clock, April 21, 2001

的大。分析其原因, 一是冠层的行陇结构与水平均匀假设不符, 特别是陇内和垄间土壤表层温度差别很大, 不能简单的用其平均温度来代表; 二是虽然太阳长波辐射在热红外波段很弱, 但短波辐射可使地面增温, 使得地表温度在三维空间的分布与太阳方向相关, 间接造成类似“热点效应”的现象。这两方面的误差是基于水平均匀假设的辐射传输模型的固有缺点。

如前所述, 本模型并非独立完善的, 而是必须与其它模型配合使用。因为几何光学模型在描述由光照和阴影产生的辐射方向性特征方面更具优势, 所以把辐射传输和几何光学模型合理结合, 可以使模型兼有二者的长处。在 LSF 的概念模型中, 非同温混合像元的发射率表达为^[3]:

$$\epsilon_0 = \epsilon_{BRDF} + \Delta\epsilon_{GO} \left(T | T_0 \right) \quad (8)$$

式中波长 λ 和观测方向 θ 的记号都被省略。 ϵ_{BRDF} 是由基尔霍夫定律决定的方向发射率, 即 1 减方向半球反射率, 与温度分布无关, 在 LSF 原文中用 Hapke 公式计算。 $\Delta\epsilon_{GO} \left(T | T_0 \right)$ 称为“当温度分布为 T 而参考温度为 T_0 时发射率的视在增量”。

LSF 作者在提出模型时偏重于定义像元尺度的发射率, 如果不做这方面考虑, 而只是建立亚像元温度结构与像元总体热辐射的渊源关系, 则也可以把像元热辐射以如下方式表达:

$$L = L_{RT}(T) + \sum_i a_i \epsilon_i \left(L_B(T_i) - L_B(T) \right) \quad (9)$$

这里, 第一项表示在水平均匀假设下用辐射传输模型计算的方向辐射, T 表示用于辐射传输模型的参

考温度分布, 第二项表示考虑非水平均匀的温度分布后, 用几何光学模型做的修正值。

顺义实验中测量的小麦冠层可用简单的行结构的几何光学模型近似, 其特点在于把冠层和土壤进一步划分为光照面和阴影面。根据野外测量, 小麦叶片的光照面和阴影面温差并不大, 而土壤则有不可忽略的温差, 尤其是垄间的光照土壤表层温度可达到 40℃以上。因此本文中我们考虑 4 种组分的可视面积: 叶片、垄间光照土壤、间隙光照土壤、阴影土壤。并且近似认为垄间光照土壤温度比土壤平均温度高 8℃, 间隙光照土壤偏高 1℃, 阴影土壤偏低 4℃。另外, 多角度测量时传感器视场的变化必须考虑^[9], 所以我们用一个随观测角度变化的椭圆近似传感器视场(图 8)。

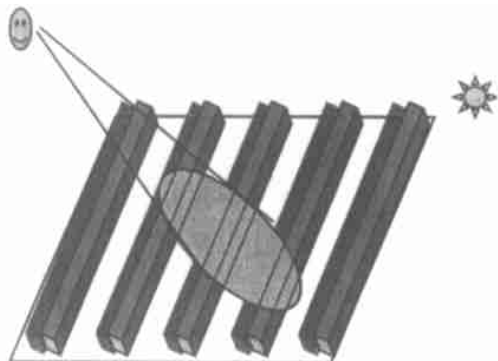


图 8 行结构的冠层模型示意图

Fig. 8 An illustration for the row-structure model

用(9)式计算的小麦冠层方向热辐射见图 9, 模型预测与实际测量的辐射亮温分布的形状基本相

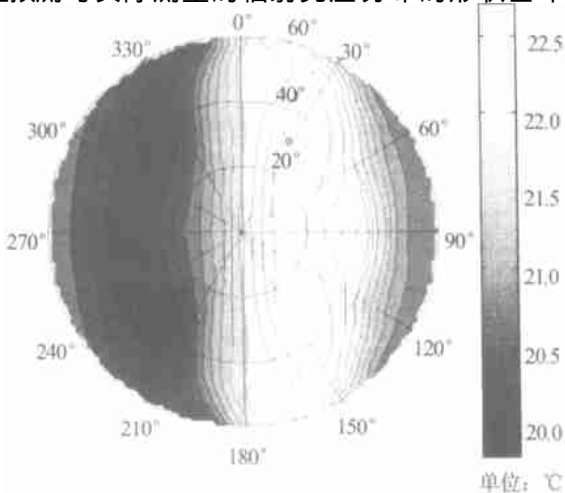


图 9 传输模型与行结构模型结合模拟热辐射方向性

Fig. 9 Simulation of brightness temperature of wheat canopy with model that integrated the extended

SAIL model and row-structure model

似, 剩下的误差一方面来源于辐射温度和组分温度测量误差, 一方面是因为我们这里使用的行结构模型把行垄结构假设为长方形几何实体, 与真实的作物结构仍有一定差异。因为行结构模型不是本文的重点, 这里只是用它作为一个例子说明辐射传输模型与几何光学模型结合的方法。

表 2 用于模拟 4 月 21 日上午 10 点观测数据的参数设置

Table 2 Setting of parameters for simulating the observation made in the morning of April 21

Table with 4 columns: Component, Sub-component, Parameter, and Value. Rows include Leaf (Upper/Lower), Soil Underneath, Sky Light, and Sun Angle.

7 结 论

热红外地表辐射特性研究中, 常把可见光波段 BRDF 模型的一些已有结果通过基尔霍夫定律引入热红外模型。这么做当然是可以的, 但是因为可见光波段 BRDF 模型的这些结果通常已经在特定假设下做了简化, 所以适用范围有限。本文在热红外波段直接推导辐射传输方程, 它虽然不象 Hapke 公式那样具有简单的解析表达式, 但是通过计算机程序实现后是同样方便和高效的, 而且它具有两个优点: (1) 可以适用于各种类型的多层水平均匀植被; (2) 可以计算组分的有效发射率或发射率的多次散射增量。

另一方面, 地表的热辐射特征并不是仅仅一个辐射传输模型就能解释的, 所以我们看到本模型预测的辐射方向性与实测结果相比有一定的出入。由于新的一些热红外模型从概念上都把多次散射和温差作为两个相对独立的因素, 而本模型在计算多次散射方面有优势, 所以本模型适合于做更高层次的热红外模型(例如 LSF 的概念模型)的一个基本组件, 与偏重几何光学的模型结合使用。

参考文献 (References)

- [1] Li X, A Strahler. Geometric-Optical Modeling of Conifer Forest Canopy [J] . *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1985, **GE-23** (5): 705—721.
- [2] Bruce Hapke. Bidirectional Reflectance Spectroscopy I: Theory [J] . *Journal of Geophysical Research*, 1981, **86**(B4): 3039—3054.
- [3] Li Xiaowen, Alan H Strahler, Mark A Friedl. A Conceptual Model for Effective Directional Emissivity from Nonisothermal Surfaces [J] . *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1999, **37**(5): 2508—2517.
- [4] Chen Liangfu, Zhuang Jiali, Xu Xiu, *et al.* The Concept of Effective Emissivity of Non-isothermal Mixed Pixel and Its Test [J] . *Chinese Science Bulletin*, 2000, **45**(7): 788—795.
- [5] Xu Xiu, Fan Wenjie, Chen Liangfu. Matrix Expression of Thermal Radiative Characteristics for an Open Complex [J] . *Science in China (Earth Sciences)*, 2002, **45**(7): 654—661.
- [6] Verhoef W. Light Scattering by Leaf Layers with Application to Canopy Reflectance Modeling: The SAIL Model [J] . *Remote Sensing of Environment*, 1984, **16**(2): 125—141.
- [7] H Suit. The Calculation of the Directional Reflectance of Vegetative Canopy [J] . *Remote Sensing of Environment*, 1972, **2**(2): 117—125.
- [8] Chen Liangfu, Zhuang Jiali, Liu Qinhuo, *et al.* Study on the Law of Radiant Directionality of Row Crops [J] . *Science in China (Series E)*, **43**(Supp.): 70—82.
- [9] Zhang Renhua, Sun Xiaomin, Li Zhaoliang, *et al.* Revealing of Major Factors in the Directional Thermal Radiation of Ground Objects: A New Way for Improving the Precision of Directional Radiant Temperature Measuring and Data Analysis. *Science in China (Series E)*, 2000, **43**(Supp.): 34—40.

A Radiation Transfer Model to Predict Canopy Radiation in Thermal Infrared Band

LIU Qiang, CHEN Liang-fu, LIU Qin-huo, XIAO Qing

(Laboratory of Remote Sensing Information Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Canopy radiance in thermal infrared (TIR) band mainly comes from emission of canopy itself. This differs very much from the situation of visible and near infrared (VNIR) band, in which reflection plays the major role. However, the sophisticated canopy model in visible and near infrared band are still instructive to thermal infrared researches. Some recent works extend results of canopy BRDF model, such as Hapke's formula, to thermal infrared band through Kirchhoff's law that directional emissivity of a surface equals 1 minus its directional-hemispherical reflectance. However, this indirect approach is not convenient because using Kirchhoff's law means to assume isothermal condition, but most natural surface is not isothermal.

In this paper, we extend a typical canopy model in VNIR band, the SAIL model, to TIR band by adding terms of thermal emission in the radiation transfer equations. Analytic solution of the radiation transfer equations is derived. This enables us to directly simulate the emission and radiation transfer process inside the horizontal homogeneous canopy which is a good approximation to many kinds of crops. Leaf angle distribution (LAD) can be simulated discretely, and vertical canopy structure is also easily handled. Simulation of our model indicates that these factors play important role in directional signature of the canopy radiance.

The model can also be used in some flexible ways, which enable it to act as basic modular in higher level TIR model. Here, we give two examples. In the first example, we use this model to calculate multiple scattering inside canopy and derive component effective emissivity. In the second example, the result of our RT model is adjusted by a row-structured GO model to simulate the real structure of winter wheat canopy as well as the footprint of radiometer. Comparison with field measured data indicates that the horizontal homogeneous assumption is also not valid in real cases, so the better choice is to integrate RT and GO model together.

Key words: radiation transfer model; thermal IR remote sensing; directional thermal emission; effective emissivity