

文章编号: 1007-4619 (2001) 06-407-09

# 连续植被的热辐射方向性

陈良富, 柳钦火

(中国科学院 遥感应用研究所 遥感信息科学开放研究实验室, 北京 100101)

**摘 要:** 正确认识非同温混合像元热辐射方向性规律是利用多角度遥感数据反演像元组分温度的前提。论文基于局地热平衡条件和组分有效发射率概念探讨了连续植被的热辐射方向性模型。模型表明同温下的热辐射方向性只决定于连续植被体系总有效发射率的方向性, 它是各组分有效发射率的和, 决定于植被叶面和土壤表面的发射率、冠层结构参数。在非同温状况下, 组分温度通过组分有效发射率调节体系的辐射亮度方向变化。模型解释了热辐射中孔穴效应问题。并通过蒙特卡罗逆向模拟从微观探讨了热辐射方向性与植被叶面和土壤表面的发射率、冠层结构参数的关系, 并对孔穴效应引起体系发射率的增量和辐射亮度的增量进行了模拟分析。结果表明, 对于球面型连续植被, 叶面和土壤表面发射率值分别取 0.98 和 0.94 时, 垂直方向上孔穴效应使体系的总有效发射率有 0.01—0.025 幅度的增值。当连续植被处于 20°C 同温状况时, 孔穴效应引起的辐射亮度增量基本上都在 0.8°C 以上, 最高可达到 1.3°C。

**关键词:** 组分有效发射率; 热辐射方向性; 孔穴效应; 蒙特卡罗模拟

**中图分类号:** TP701 **文献标识码:** A

## 1 引 言

陆面温度(LST)反演因非同温混合像元的普遍存在而变得异常复杂, 至今大部分的反演方法都基于多通道热红外遥感数据<sup>[1-12]</sup>, 并因通道信息之间的高度相关性使反演结果对误差敏感<sup>[13]</sup>, 反演只能得到像元平均温度。Jackson 等人在 1981 年就指出, 土壤温度与植被温度有很大的差异, 如果土壤温度掺入植被冠层温度则将引起 CWSI 值的严重误差<sup>[14]</sup>。由此可见组分温度的遥感反演有其自身的意义, 多角度红外遥感由于包含地物几何结构信息和组分温度信息, 有利于直接反演混合像元组分温度<sup>[15, 16]</sup>, 但其前提是正确认识非同温混合像元热辐射亮度的方向性规律。

基于热平衡条件, 从发射率定义可知二维同温同质非黑体热辐射亮度的方向性决定于发射率的方向性, 这得到了实验的证实<sup>[17, 18]</sup>。对非同温混合像元, 众多学者通过实验观测到了热辐射亮度值随视角天顶角变化的现象<sup>[19-21]</sup>。Kimes 曾解释说由于

地表结构引起阴影效应使像元内产生组分温度差异而形成辐射亮度随角度发生变化<sup>[20]</sup>。为进一步研究这一方向特性, 除定义新的发射率概念外<sup>[7, 22-26]</sup>, 人们建立辐射模型来解释热辐射亮度值的方向性问题。如行播作物热辐射几何模型<sup>[15, 20, 27]</sup>, 三层树冠的方向辐射模型<sup>[28]</sup>, 10 层连续冠层模型<sup>[24]</sup>, 考虑温差的 LSF 模型<sup>[25]</sup>, 基于组分有效发射率概念的热辐射方向性一般模型<sup>[26]</sup>。对于由作物和土壤两相组分构成的连续植被冠层群体, 其热辐射方向性有何特点? 其方向性如何受组分光学特性和冠层结构参数, 如叶倾角分布函数(LAD)、叶面积指数(LAI)等因素的影响? 本文针对连续植被的热辐射方向性进行探讨。

## 2 连续植被的热辐射方向性模型

自然界中局地热平衡状态是可以满足的, 对于温度廓线分布的冠层, 一般将冠层分为温度不同的水平薄层, 视薄层内的组分温度近似相等<sup>[24, 29]</sup>。但层内的组分因净辐射差会造成组分阴、阳面温度差

收稿日期: 2000-11-16; 修订日期: 2001-03-20

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077900)和中国科学院知识创新工程项目资助。

作者简介: 陈良富(1965—), 男, 副研究员, 1999年7月毕业于北京大学遥感与地理信息系统研究所获博士学位, 主要从事热红外遥感模型和反演研究。

异。假设植被冠层的叶、茎等组分具有相同的发射率  $\epsilon_v(\theta)$ ，土壤表面发射率为  $\epsilon_s(\theta)$ 。由于只研究热辐射亮度在天顶角方向上的变化，假设作物组分在方位角上随机分布，在垂直高度上均匀分布，且不考虑大气下行辐射等环境辐射的干扰。为了简单明了地说明连续植被的热辐射方向性，本文避开因冠层中存在温度阔线而带来的复杂性，设作物冠层为一个温度  $T_v$ ，土壤表面温度为  $T_s$ ，则传感器观测到的辐射亮度值可表达为：

$$L_\lambda(\theta) = \epsilon_{ev}(\theta)L_{\lambda v}(T_v) + \epsilon_{es}(\theta)L_{\lambda s}(T_s) \quad (1)$$

其中  $\epsilon_{ev}(\theta)$  为植被冠层有效发射率， $\epsilon_{ev}(\theta) = [1 - p(\theta)] \cdot \epsilon_v(\theta) + \Delta\epsilon_v(\theta)$ ； $\epsilon_{es}(\theta)$  为土壤有效发射率， $\epsilon_{es}(\theta) = p(\theta) \cdot \epsilon_s(\theta) + \Delta\epsilon_s(\theta)$ 。 $p(\theta)$  为  $\theta$  方向上植被冠层的孔隙率。 $\Delta\epsilon_v(\theta)$  和  $\Delta\epsilon_s(\theta)$  分别为植被冠层和土壤辐射后经多次散射达到传感器的辐射亮度增值与同温下冠层和土壤黑体辐射的比值，故可称为因多次散射而引起的比辐射率增量，与冠层的  $LAD$ 、 $LAI$ 、 $\epsilon_v(\theta)$  和  $\epsilon_s(\theta)$  有关。当体系处于同温状况时，则公式(1)可变为如下形式：

$$\begin{aligned} L_\lambda(\theta) &= [\epsilon_{ev}(\theta) + \epsilon_{es}(\theta)] \cdot L_{\lambda v}(T) \\ &= \epsilon_e(\theta) \cdot L_{\lambda v}(T) \end{aligned} \quad (2)$$

这样就有， $\epsilon_e(\theta) = \epsilon_{ev}(\theta) + \epsilon_{es}(\theta)$ 。 $\epsilon_e(\theta)$  是作物土壤体系的总有效发射率，只与组分结构状况和组分光学特性有关，而与组分温度无关。公式(1)和(2)表明：当体系同温时，连续植被热辐射方向性表现为该体系固有辐射能力随天顶角的变化，通过总有效发射率  $\epsilon_e(\theta)$  得到体现， $\epsilon_e(\theta)$  通过反射率对体系外界的入射辐射作出反映，即  $\rho(\theta) = 1 - \epsilon_e(\theta)$ ，且只与组分的发射率、叶面积指数  $LAI$  和冠层叶倾角分布函数  $LAD$  有关，与组分温度无关。当体系为非同温时，热辐射亮度的方向性由组分有效发射率和组分温度共同决定。

在探讨连续植被热辐射问题时常涉及孔穴效应问题<sup>[31]</sup>。Francois 等人用一个系数  $\alpha$  来描述孔穴效应<sup>[24]</sup>。孔穴效应就是多次散射效应，可以从公式(2)的总有效发射率  $\epsilon_e(\theta)$  中得到反映。 $\epsilon_e(\theta)$  可以表达为体系直接辐射和多次散射辐射两部分的贡献之和：

$$\begin{aligned} \epsilon_e(\theta) &= \{ [1 - p(\theta)] \cdot \epsilon_v(\theta) + p(\theta) \cdot \epsilon_s(\theta) \} \\ &\quad + \{ \Delta\epsilon_v(\theta) + \Delta\epsilon_s(\theta) \} \end{aligned} \quad (3)$$

上式中右边第一项为体系直接辐射部分，用  $\epsilon_e^1(\theta)$

表示；第二项就是体系多次散射引起的发射率增量，实质上就是孔穴效应项，用  $\epsilon_e^{mult}(\theta)$  表示。则：

$$\begin{aligned} \epsilon_e^1(\theta) &= [1 - p(\theta)] \cdot \epsilon_v(\theta) + p(\theta) \cdot \epsilon_s(\theta) \quad (4) \\ \epsilon_e^{mult}(\theta) &= \Delta\epsilon_v(\theta) + \Delta\epsilon_s(\theta) \end{aligned} \quad (5)$$

由于多次散射效应直接决定于冠层结构、组分的光学特性。所以一旦植被冠层的  $LAI$ 、 $LAD$ 、 $\epsilon_v(\theta)$ 、 $\epsilon_s(\theta)$  确定以后， $\theta$  方向上的孔穴效应  $\epsilon_e^{mult}(\theta)$  就是确定的，它可通过蒙特卡罗方法模拟计算。

### 3 热辐射方向性的蒙特卡罗逆向模拟结果

本文采逆向蒙特卡罗跟踪方法，模拟光子从传感器终端逆向将光子射向植被冠层后，统计连续植被对光子的吸收状况，具体模拟过程已经在前文<sup>[32]</sup>中详细阐述。逆向模拟有如下特点：(1) 每个角度被模拟所用的光子数只要达到随机统计的样本数就够了，样本数与组分温度无关。(2) 模拟是从传感器的点方向射出光子进行模拟的，模拟得到的此方向的有效发射率精度大。(3) 很容易区分、组分直接辐射和多次散射的发射率，区分不同组分间或同一组分内不同温度的组分对体系总体的贡献情况，有助于冠层热辐射规律的微观认识。(4) 能得到植被冠层体系两个层次上的方向性——体系有效发射率的方向性和辐射亮度值的方向性。

#### 3.1 组分有效发射率方向性模拟结果

##### 3.1.1 $LAD$ 对有效发射率的影响

为了说明不同  $LAD$  的冠层结构对热辐射方向性的影响，本文引入三种典型的冠层叶倾角分布函数<sup>[33]</sup>，即水平型  $g = \delta(\mu_l - 1)$ ， $G = |\mu_l|$ ；球面型  $g = 1$ ， $G = 0.5$ ；垂直型  $g = \delta(\mu_l - 0)$ ， $G = 2(1 - \mu_l^2)^{1/2}/\pi$ 。植被叶面和土壤表面为朗伯体，发射率  $\epsilon_v$ 、 $\epsilon_s$  值取 0.98 和 0.94<sup>[24]</sup>，叶面积指数分别取 0.5 和 4.0。经模拟得到连续植被有效发射率随视角的变化情况(图 1)。图 1 表明不同的  $LAD$  对总有效发射率、冠层和土壤有效发射率的影响很大。其中  $LAD$  为水平型时，体系的总有效发射率、植被和土壤有效发射率均不随视角天顶角的变化而变化。这与 Otteman 对叶倾角为水平型分布的植被冠层的模拟结果是一致的<sup>[34]</sup>。

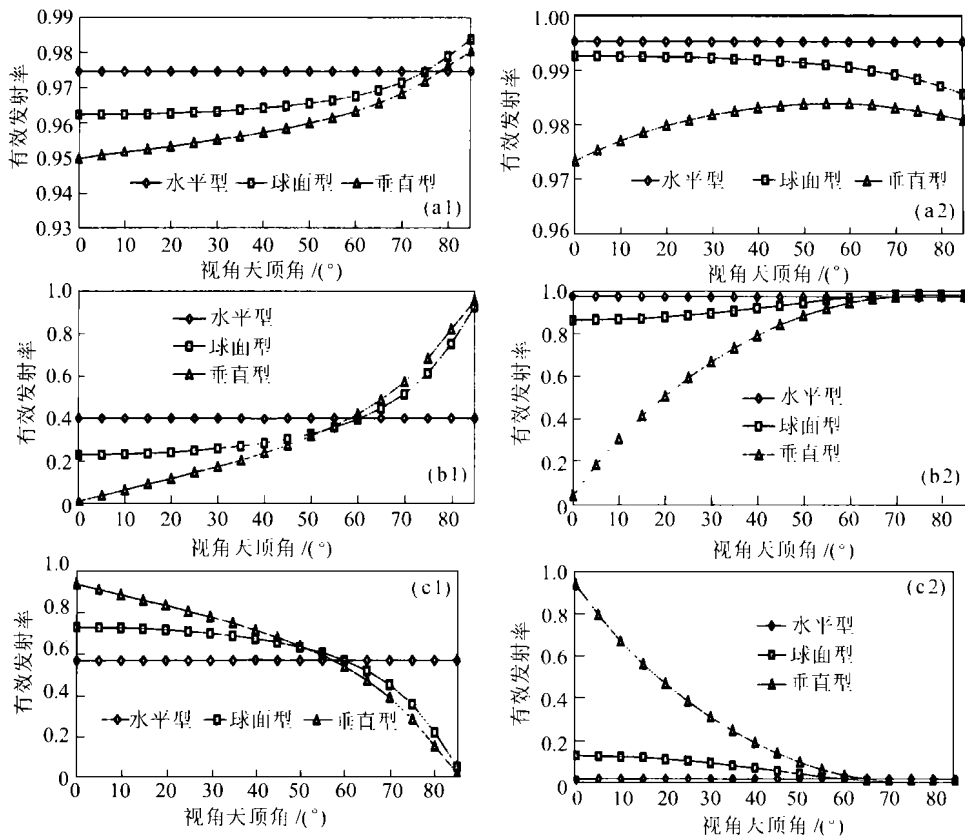


图 1 不同 LAD 情况下的有效发射率随视角天顶角的变化(a:总有效发射率,b:植被有效发射率,c:土壤有效发射率。角标 1: LAI=0.5; 2: LAI=4.0)

Fig. 1 Variations with zenith view angle and LAD of simulated effective emissivities when LAI is set to different value (a: Whole effective emissivities; b: Vegetation effective emissivity; c: Soil effective emissivity; Subscript 1: LAI=0.5; 2: LAI=4.0)

### 3.1.2 LAI 对有效发射率和孔穴效应的影响

以球形型 LAD 为例,  $\epsilon_v$ ,  $\epsilon_s$  值取不变,在不同的 LAI 状况下,模拟得到了总有效发射率和组分有效发射率结果。图 2 表明,体系总有效发射率随 LAI 的增大而增大,但当 LAI=3.0 以后,总有效发射率

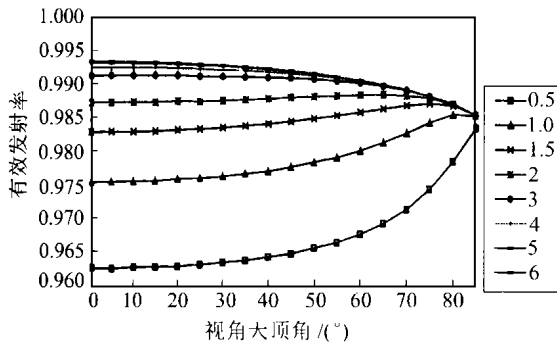


图 2 总有效发射率  $\epsilon_e(\theta)$  随视角和 LAI 的变化情况

Fig. 2 Variation of  $\epsilon_e(\theta)$  with zenith view angle

when LAI is set to different value

变化很小。

总有效发射率可以表达为直接辐射和多次散射两部分。直接发射率(见图 3(a))随 LAI 的增大而增大,但最大不超过植被单叶面的发射率 0.98,因为土壤表面的发射率只有 0.94。多次散射引起的发射率的增量部分比较复杂,多次散射效应即为孔穴效应,可用发射率值来衡量(见图 3b)。当 LAI=2 时,孔穴效应在视角 30°以内可达 0.02 以上;当 LAI 继续增大时孔穴效应反而下降。当 LAI 大于 1.0 时,视角 60°以内的孔穴效应引起的体系有效发射率的增量均在 0.01 以上,视角在 30°以内则达到 0.015 以上。所以对于连续植被来说,孔穴效应明显地增加了体系的发射率。

为了进一步从微观上认识有效发射率的方向性,植被和土壤的有效发射率被分别模拟,且均分别统计为直接辐射和多次散射两部分。图 4(a)表明植被有效发射率的直接辐射部分随 LAI 和视角的增

大而增大,因为 LAI 和视角增大,冠层的孔隙率减小(见图 5)。则公式(3)中植被的可视面积比[1-

$p(\theta)]$ 增大,导致 $[1-p(\theta)]\epsilon_v$ 增大。相反,土壤直接有效发射率则随 LAI 和视角的增大逐渐减小。

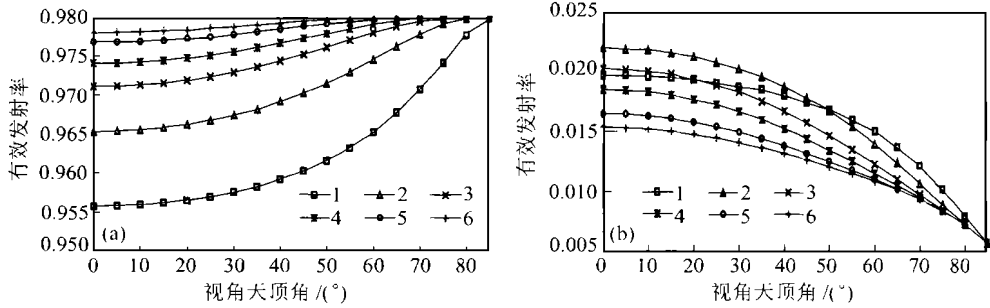


图 3 不同 LAI 时总有效发射率两部分值随视角变化的情况

(a)  $\epsilon_v^l(\theta)$ ; (b)  $\epsilon_e^{\text{mult}}(\theta)$

Fig. 3 Variation of components of  $\epsilon_e(\theta)$  with zenith view angle and LAI (a:  $\epsilon_v^l(\theta)$ ; b:  $\epsilon_e^{\text{mult}}(\theta)$ )

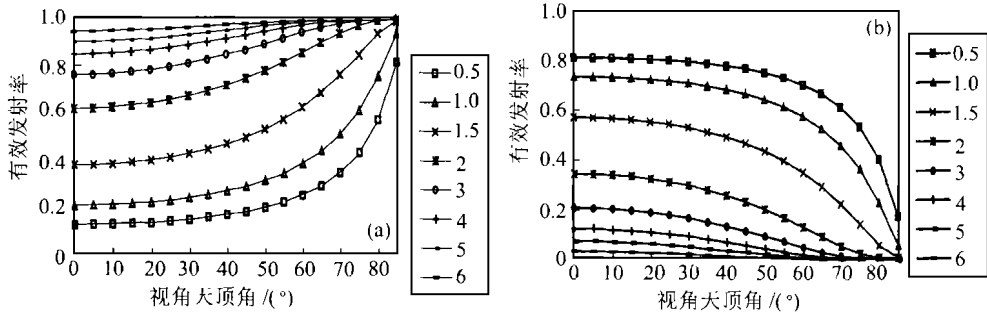


图 4 植被和土壤有效发射率中的直接辐射部分随视角和 LAI 的变化情况

(a) 植被直接辐射部分; (b) 土壤直接辐射部分

Fig. 4 Variation of direct emission effective emissivities of vegetation and soil with zenith view angle and LAI (a: vegetation; b: soil)

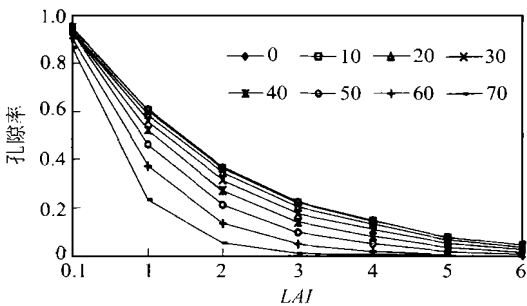


图 5 不同视角情况下孔隙率随 LAI 值的变化情况

Fig. 5 Variation of gap probability with LAI and zenith view angle

### 3.1.3 组分发射率对有效发射率的影响

为了和Francios的结果相比较,模拟中  $\epsilon_v$ 、 $\epsilon_s$  的取 Francios 文<sup>[24]</sup>中一样的值。图 6(a)是当  $\epsilon_v$  为 0.98,  $\epsilon_s$  在 0.6-0.96 之间时,垂直方向上的总有效发射率  $\epsilon_e(\theta)$  随 LAI 变化的情况。图 6(b)是  $\epsilon_s$  为

0.94,  $\epsilon_v$  在 0.90-0.98 之间时,垂直方向上的  $\epsilon_e(\theta)$  随 LAI 变化的情况。这种变化情况和Francios对“冠层比辐射率”模拟结果趋势相一致。

另外,在  $\epsilon_v$ 、 $\epsilon_s$  取不同值时,获得了垂直方向上孔隙效应  $\epsilon_e^{\text{mult}}(\theta)$  随 LAI 的变化情况,模拟结果分别列于图 7。图 7(a)表明,当  $\epsilon_v$  为 0.98 时,  $\epsilon_s$  越小,  $\epsilon_e^{\text{mult}}(\theta)$  越大。原因是反射率与发射率是互补的,反射率值越高,土壤反射冠层的下行辐射就越多,多次散射过程就越强烈,所以孔隙效应就越强。当  $\epsilon_s$  取 0.94,  $\epsilon_v$  取 0.90-0.98 之间的不同值时,  $\epsilon_e^{\text{mult}}(\theta)$  随 LAI 基本呈增加趋势(见图 7(b))。

### 3.2 热辐射亮度方向性模拟结果

#### 3.2.1 组分温度对辐射亮度方向性的影响

公式(1)表明,对于非同温像元,热辐射亮度值的方向性除了受组分有效发射率的影响外,还受组

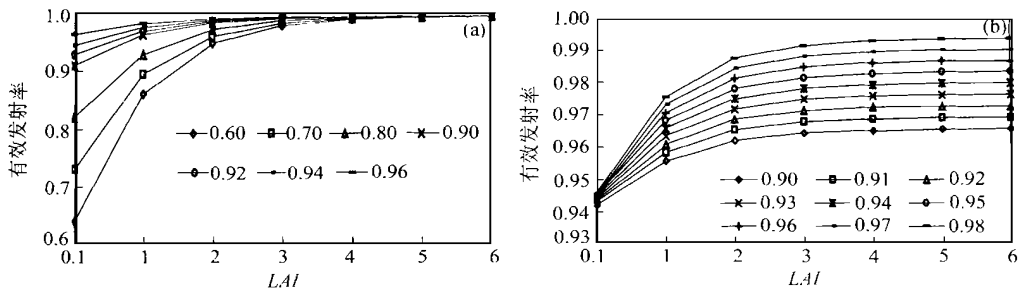


图 6 不同组分发射率时垂直方向上总有效发射率随 LAI 的变化情况 (a)  $\epsilon_v=0.98$ ,  $\epsilon_s$ : 0.6—0.96; (b)  $\epsilon_s=0.94$ ,  $\epsilon_v$ : 0.9—0.98

Fig. 6 In nadir view angle, the variation of whole effective emissivity with LAI when the component emissivities are set to different values (a:  $\epsilon_v=0.98$ ,  $\epsilon_s$ : 0.6—0.96; b:  $\epsilon_s=0.94$ ,  $\epsilon_v$ : 0.9—0.98)

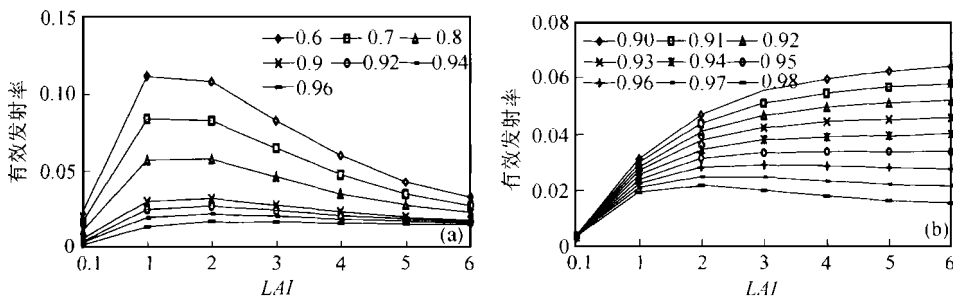


图 7 不同组分发射率时垂直方向上孔径效应  $\epsilon_e^{mult}(0)$  随 LAI 的变化情况 (a)  $\epsilon_v=0.98$ ,  $\epsilon_s$ : 0.6—0.96; (b)  $\epsilon_s=0.94$ ,  $\epsilon_v$ : 0.9—0.98

Fig. 7 In nadir view angle, the variation of cave effects  $\epsilon_e^{mult}(0)$  with LAI when the leaf facet emissivity and soil surface emissivity are set to different values (a:  $\epsilon_v=0.98$ ,  $\epsilon_s$ : 0.6—0.96; b:  $\epsilon_s=0.94$ ,  $\epsilon_v$ : 0.9—0.98)

分温度的影响。图 8 是当 LAI 分别取 1.0 和 5.0 时冠层和土壤的有效发射率  $\epsilon_{cv}(\theta)$  和  $\epsilon_{cs}(\theta)$ , 以及总有效发射率  $\epsilon_e(\theta)$  随视角变化的情况。设  $T_v$  为  $20^\circ\text{C}$ ,  $T_s$  分别设为  $20^\circ\text{C}$ ,  $22^\circ\text{C}$ ,  $24^\circ\text{C}$  的三个非同温体系, 将组分温度和组分有效发射率代入公式(1)就得到热辐射亮度值随视角变化的情况(见图 9)。该图表明当体系同温时, 不管 LAI 值多大, 热辐射亮度的方向性完全取决于  $\epsilon_e(\theta)$  的方向变化趋势(见图 8 (b))。当  $T_s$  分别取  $22^\circ\text{C}$ 、 $24^\circ\text{C}$  和  $26^\circ\text{C}$  值时, 组分温度对热辐射亮度方向性变化进行调节。图 9(a) 表明, 组分温度差越大, 辐射亮度值随视角变化的幅度就越大。但当 LAI 增大后, 组分温度差异对辐射亮度值方向变化影响减小(见图 9(b))。

这一结果在野外观测中得到了证实。在 1999 年 4 月 13 日—18 日期间, 我们在中科院禹城站的遥感实验场进行了野外观测。观测目标是 LAI 大约为

3.0 间苗的冬小麦, 热辐射计波长为 10.4—14  $\mu\text{m}$ , 离目标物 150cm。4 月 15 日北京时间上午 7 时 10 分, 由于组分温度比较相近, 冬小麦可以视为同温状况, 观测得到的热辐射亮度值随视角天顶角变化的情况见图 10(a)。图中数值表明, 热辐射亮度值的方向性随视角变化十分缓慢, 这一方向性主要是由于组分的光学特性、冬小麦的 LAI 和 LAD 引起的。但在 4 月 17 日北京时间下午 2 时 02 分所测量得到的热辐射亮度值(见图 10(b))表明, 冬小麦热辐射方向性变化的幅度明显增大。这是因为此时土壤温度  $T_s$  要明显高于冬小麦叶面温度  $T_v$ , 冬小麦地已成为非同温像元, 具有温度差异的组分温度参与了热辐射亮度值的方向性变化。由于  $T_s$  高, 所以在孔隙率较大的天顶角测得的热辐射亮度值大, 并随视角的增大减小。

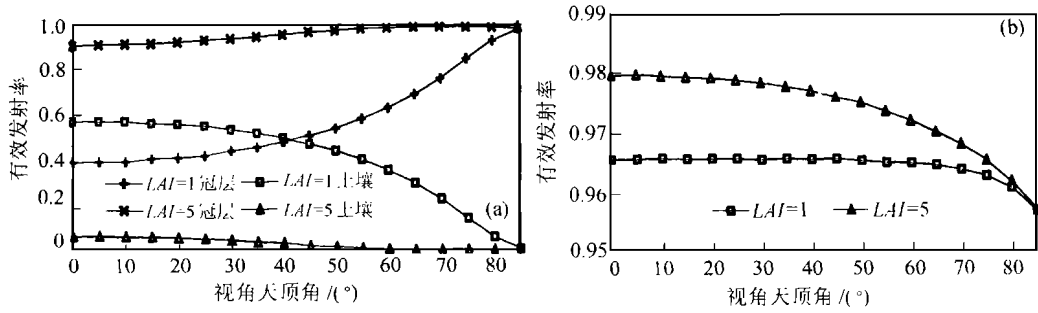


图8 不同 LAI 时有效发射率随视角的变化 (a: 组分有效发射率;b: 总有效发射率)

Fig. 8 Variation of effective emissivities with zenith view angle and LAI (a: component effective emissivity, the hollow marks stand for vegetation, solid marks for soil; b: whole effective emissivity)

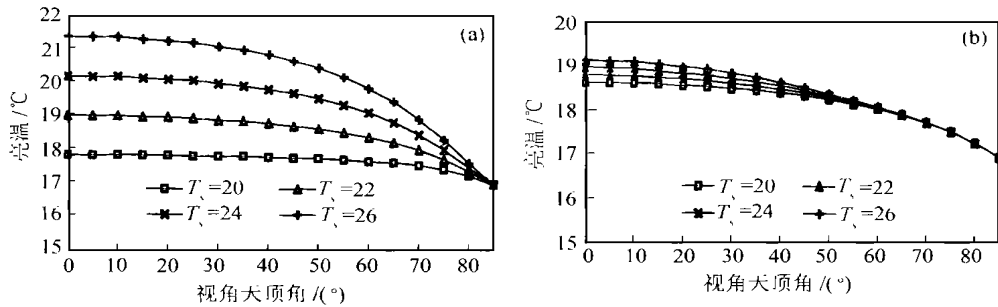


图9 不同土壤温度时体系热辐射亮度值在不同 LAI 情况下随视角的变化(a: LAI=1.0; b: LAI=5.0)

Fig. 9 Variation of radiant brightness temperature with LAI under different soil temperatures, 20°C, 22°C, 24°C and 26°C when vegetation temperature is set to 20°C (a: LAI=1.0; b: LAI=5.0)

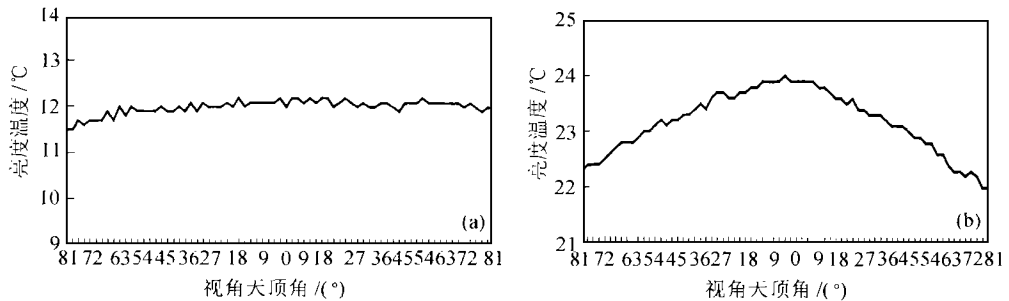


图10 不同时间的冬小麦热辐射亮度值随角度变化情况(a: 目标接近同温状况; b: 目标为非同温状况)

Fig. 10 Comparison of radiant brightness temperatures with zenith view angle received under different time in winter wheat field (a: temperatures of winter wheat and soil are close; b: big temperature difference between the two components)

### 3.3.2 孔穴效应对辐射亮度的影响

上文分别探讨了 LAI 和组分发射率对孔穴效应的影响,当植被和土壤温度均为 20°C 时,得到了不同 LAI 时孔穴效应增加体系辐射亮度值的情况(见图 11),以及植被和土壤发射率为不同值获得辐射亮度孔穴效应增值(见图 12)。

图 11 表明,当  $\epsilon_v$  和  $\epsilon_s$  分别取 0.98 和 0.94, 组分温度为 20°C 时,由于孔穴效应而引起的辐射亮度值基本上都在 0.8°C 以上,最高可达到 1.3°C,且最大值一般出现在垂直方向,随视角天顶角的增大,辐射亮度值增量减弱。

图 12(a)表明,当  $\epsilon_s$  取恒值,  $\epsilon_v$  越小孔穴效应越

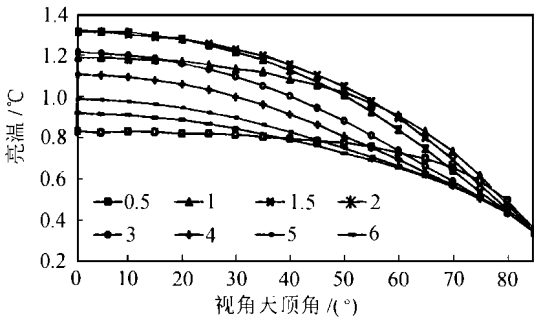


图 11 LAI 取不同值时孔穴效应引起的辐射亮度值随视角的变化

Fig. 11 Variation with zenith view angle of radiant brightness temperature increment caused by cave effects when LAI is set to different value.

大。当  $LAI > 1$ ,  $\epsilon_v < 0.96$  时,垂直方向上的孔穴效应引起的辐射亮度的增量在  $1^\circ\text{C}$  以上。而当  $\epsilon_v = 0.98$  时,  $\epsilon_s$  越小,土壤对热辐射的反射越强,孔穴效应引起的辐射亮度值也越大。当 LAI 在 1.0—3.0 之间,孔穴效应引起的辐射亮度值达到最大(见图 12(b))。

### 4 结论与讨论

(1) 通过引入组分有效发射率概念得到的模型表明,同温下体系的热辐射方向性完全取决于总的有效发射率  $\epsilon_e(\theta)$  的方向性。 $\epsilon_e(\theta)$  是各组分有效发射率的总和,它与  $\epsilon_v$ 、 $\epsilon_s$ 、LAI、LAD 有关。它对外界的反应是通过关系式  $\rho(\theta) = 1 - \epsilon_e(\theta)$  来实现的,这里  $\rho(\theta)$  是目标的方向-半球反射率。所以  $\epsilon_e(\theta)$  和 Francios 等人定义的“冠层比辐射率”<sup>[24]</sup> 具有同样的物理意义。唯一区别是  $\epsilon_e(\theta)$  通过模拟各组分有效吸收特性获得,而“冠层比辐射率”则是通过测量冠层组分的反射率而得到。当目标为非同温状况时,组分温度通过组分有效发射率影响热辐射亮度的方向性变化。由于组分温度差异可以达到较大的数值,所以非同温状况下热辐射亮度的方向性要比同温状况的方向性变化幅度大,但其幅度因 LAI 的增大而减小。野外测量结果已经证实了这一现象(见图 13)。

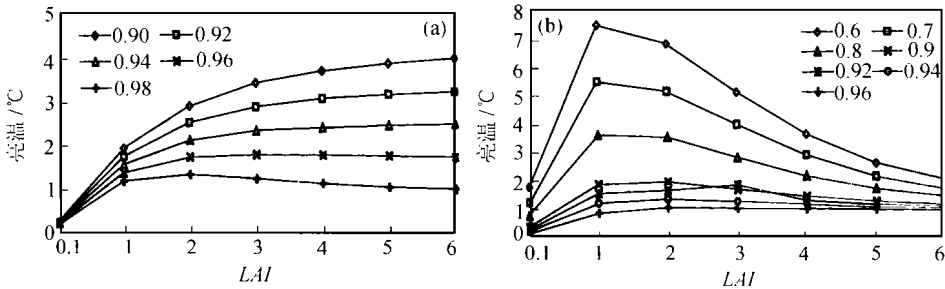


图 12  $\epsilon_v$  和  $\epsilon_s$  取不同值时垂直方向上孔穴效应引起的辐射亮度随 LAI 的变化情况 ((a):  $\epsilon_s = 0.94$ ,  $\epsilon_v$ : 0.9—0.96; (b):  $\epsilon_v = 0.98$ ,  $\epsilon_s$ : 0.6—0.96)

Fig. 12 Variation with LAI of radiant brightness temperature increment caused by cave effects when leaf facet emissivity and soil surface emissivity are set to different values

(2) 只要给出不同组分间、或同一组分内不同温度的分布状况,在局地热平衡条件下用蒙特卡罗逆向模拟获得相应的组分有效发射率后,可根据公式(1)计算非同温混合像元的热辐射亮度的方向性。逆向模拟的效率和精度较高,很容易区分各组分有效发射率,以及直接发射率和多次散射发射率,有助于从微观上了解连续植被复杂的热辐射方向性规律。

(3) 有效发射率的多次散射部分  $\epsilon_e^{mult}(\theta)$  就是体系的孔穴效应。逆向模拟能方便地获得  $\epsilon_e^{mult}(\theta)$ , 有利于分析  $\epsilon_e^{mult}(\theta)$  与 LAI、LAD、组分发射率之间的关系,但  $\epsilon_e^{mult}(\theta)$  与这些参数间的解析化表达还需进

一步探讨。在  $\epsilon_v$ 、 $\epsilon_s$  分别取 0.98 和 0.94 值时,模拟结果表明体系的孔穴效应可使体系总有效发射率有 0.01—0.025 幅度的增值。对于  $20^\circ\text{C}$  的连续植被,孔穴效应引起的辐射亮度值增量基本上都在  $0.8^\circ\text{C}$  以上,最高可达到  $1.3^\circ\text{C}$ 。当  $\epsilon_s = 0.94$ ,  $\epsilon_v < 0.96$  时,在  $LAI > 1$  的范围内,体系垂直方向上孔穴效应引起的辐射亮度增量在  $1^\circ\text{C}$  以上。这一结果表明,要实现组分温度反演 1K 精度,必须高度重视孔穴效应。

致谢 徐希孺教授给予了有益的指导,李小文教授对论文提出了有益的建议,庄家礼参与实验测

量,在此表示感谢。

### 参 考 文 献 (References)

- [1] Becker F. The Impact of Spectral Emissivity on the Measurement of Land Surface Temperature from a Satellite [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1987, **8**: 1509—1522.
- [2] Becker F, Li Z. Towards a Local Split-window Method Over Land Surface [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, **11**: 369—393.
- [3] Prata J. Land Surface Temperatures Derived from the Advanced Very High Resolution Radiometer and the Along-Track Scanning Radiometer—2; Experimental Results and Validation of AVHRR Algorithms [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, **98**: 13025—13058.
- [4] Price J C. Estimation Surface Temperature from Satellite Thermal Infrared Data—a Simple Formulation for the Atmospheric Effect [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1983, **13**: 353—361.
- [5] Price J C. Land Surface Temperature Measurements from the Split Windows Channel of NOAA-7 AVHRR [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, **89**: 7231—7237.
- [6] Wan Z, Dozier J. Land Surface Temperature Measurement from Space; Physical Principles and Inverse Modeling [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1989, **27**: 268—278.
- [7] Wan Z, Dozier J. A Generalized Split-Window Algorithm for Retrieving Land-Surface Temperature from Space [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, **34**: 892—905.
- [8] Li Z, Becker F. Feasibility of Land Surface Temperature and Emissivity Determination from AVHRR Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, **43**: 67—85.
- [9] Wan Z, Li Z. A Physics-based Algorithm for Retrieving Land-Surface Emissivity and Temperature from EOS/MODIS Data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, **35**: 986—996.
- [10] Tonooka H, Hoshi T. Feasibility of Atmospheric and Surface Parameters Determination from TIR Multispectral Data Over Land [C]. in Proc. 17th Asian Conf. Remote Sensing, 1996, **G7**, 1—6.
- [11] Gillesole A R, Rokugawa R, Hook S J, et al. Temperature/emissivity Separation Algorithm Theoretical Basis Document. 1996, Version 2.3. Available: <http://asterweb.jpl.nasa.gov/asterhome/atdb/docs.htm>, 74.
- [12] Xu X, Liu Q, Chen J. Synchronous Retrieval of Land Surface Temperature and Emissivity [J]. *Science in China (Series D)*, 1998, **41**: 658—668.
- [13] Chen L, Zhuang J, Xu X. The Correlation of Multi-channel Thermal Infrared Remote Sensing Information and Its Effect on Retrieval of Land Surface Temperature [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, **44**(17): 1627—1632.
- [14] Jackson R D, Reginato R J, Pinter P J. Canopy Temperature as a Crop Water Stress Indicator [J]. *Water Resource Research*, 1981, **17**: 1133—1138.
- [15] 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**: 33—55.
- [16] Xu X, Chen L, Zhuang J. Genetic Inverse Algorithm for Retrieval of Component Temperature of Mixed Pixel by Multi-angle Thermal Infrared Remote Sensing Data [J]. *Science in China (Series D)*, 2001, **44**(4): 363—372.
- [17] Dozier J, Warren S G. Effect of Viewing Angle on Infrared Brightness Temperature of Snow [J]. *Water Resources Research*, 1982, **18**: 1424—1434.
- [18] Labed J, Stoll M P. Spatial Variability of Land Surface Emissivity in the Thermal Infrared Band; Spectral Signature and Effective Surface Temperature [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, **38**: 1—17.
- [19] Balick L E, Hutchinson B A. Directional Thermal Infrared Exitance Distributions from a Leafless Deciduous Forest [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1986, **24**: 693—698.
- [20] Kimes D S, Kirchner J A. Directional Radiometric Measurements of Row-crop Temperatures [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1983, **4**: 299—311.
- [21] Lagouarde J P, Kerr Y H, Brunet Y. An Experimental Study of Angular Effects on Surface Temperature for Various plant Canopies and Bare soils [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, **77**: 167—190.
- [22] Norman J, Becker F. Terminology in Thermal Infrared Remote Sensing of Natural Surface [J]. *Agriculture and Forest Meteorology*, 1995, **77**: 153—176.
- [23] Becker F, Li Z. Surface Temperature and Emissivity at Various Scale; Definition, Measurement, and Related Problem [J]. *Remote Sensing Review*, 1995, **12**: 225—253.
- [24] Francois C, Otle C, Prevot L. Analytical Parameterization of Canopy Directional 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**: 2587—2621.
- [25] Li X, Strahler A H, Friedl M A. A Conceptual Model for Effective Directional Emissivity from Nonisothermal Surfaces [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, **37**: 2508—2517.
- [26] Chen L, Zhuang J, Xu X, et al. The Concept of Effective Emissivity of Non-isothermal Mixed Pixel and Its Test [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, **45**: 788—795.
- [27] Sobrino J A, Caselles V. Thermal Infrared Radiance Model for Interpreting Thermal Radiation from a Terrestrial Surface [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1990, **18**: 759—763.
- [28] Kimes D S, Smith J A, Link L E. Thermal IR Exitance Model of a Plant Canopy [J]. *Applied Optics*, 1981, **20**: 623—632.
- [29] Kimes D S, Kirchner J A. Radiative Transfer Model for Heterogeneous 3-D Scenes [J]. *Applied Optics*, 1982, **21**: 4119—4129.
- [30] Qin W, Xiang Y. On the Hotspot Effect of Leaf Canopies; Modeling Study and Influence of Leaf Shape [J]. *Remote Sensing of*

- Environment*, 1994, **50**: 95–106.
- [31] Sutherland R A, Bartholic J F. Significance of Vegetation in Interpreting Thermal Radiation from a Terrestrial Surface [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1977, **18**: 759–763.
- [32] Chen L, Zhuang J, Xu X, *et al*. The Simulation of Thermal Radiant Directionality of Continuous Vegetation Using Monte Carlo Method [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, **4**(4): 261–265. [陈良富, 庄家礼, 徐希孺等. Monte Carlo 方法模拟连续植被热辐射方向性[J]. 遥感学报, 2000, **4**(4): 261–265]
- [33] Nilson T. A Theoretical Analysis of the Frequency of Gaps in Plant Stands [J]. *Agricultural Meteorology*, 1970, **8**: 25–38.
- [34] Otterman J, Brakke T W, Fuchs M, *et al*. Longwave Emission from A Plant/soil surface as a function of the view direction; dependence on the canopy architecture [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, **20**: 2195–2201.

## The Thermal Radiant Directionality of Continuous Vegetation

CHEN Liang-fu, LIU Qin-huo

(LARSIS, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The correct recognition of radiant directionality of non-isothermal mixed pixel is a precondition to its retrieval of component temperatures. Based on the local thermal equilibrium and component effective emissivity concept the radiant model of continuous vegetation has been studied. The model shows that the radiant directionality of isothermal mixed pixel is fully dependent on that of whole effective emissivity of pixel, which is a function of component emissivities and the crown construct. For nonisothermal mixed pixel, the component temperatures play important role in adjustment of radiant directionality. The paper studies the relationship between the radiant directionality with leaf facet emissivity, soil surface emissivity, leaves area index (*LAI*) and leaves angle distribution (*LAD*) by Monte Carlo simulated results, it further analyses the whole effective emissivity and radiance increments caused by cave effects. Take the spherical type of *LAD* as an example, and set the values of leaf facet emissivity and soil surface emissivity to 0.98 and 0.94 respectively, the increment of whole effective emissivity ranges from 0.01 to 0.025 when value of *LAI* is set to more than 1.0 in nadir direction. When the vegetation and soil system is isothermal with 293K temperature, the radiant brightness temperature increment is more than 0.8K, the maximum is 1.3K caused by cave effects.

**Key words:** Component effective emissivity; thermal radiant directionality; cave effects; Monte Carlo simulation.