

文章编号: 1001 - 9014 (2010) 01 - 0038 - 07

植被冠层 3D 辐射传输模型及热辐射方向性模拟

杨贵军^{1,2}, 柳钦火², 刘 强², 肖 青², 黄文江¹

(1. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097;

2. 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)

摘要:研究了植被冠层的热辐射方向性并建立了有关模型. 从辐射传输机理出发, 建立了 3D 冠层场景, 并将场景以微分体元方式进行离散, 根据给定的观测几何参数进行逐个体元内部与体元之间的多次散射及发射辐射传输计算, 最终通过积分运算得到所有微分体在半球空间上对给定观测方向上的热辐射, 得出整个冠层的热辐射方向性. 利用两个时相的地面观测数据对 3D 辐射传输模型及模拟结果进行了验证和分析, 相关系数分别为 0.91 和 0.79, RMSE 分别为 0.4K 和 0.6K, 证明建立的模型是有效的, 能改进热红外温度反演精度和实现组分温度反演.

关键词: 3D 辐射传输模型; 热辐射方向性; 微分体元; 冠层

中图分类号: TP722.5 文献标识码: A

DIRECTIONAL SIMULATION OF THERMAL INFRARED RADIATION AND 3D RADIATIVE TRANSFER MODEL OF CANOPY

YANG Gui-Jun^{1,2}, LU Qin-Huo², LU Qiang², XIAO Qing², HUANG Wen-Jiang¹

(1. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China;

2. The State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal, Beijing 100101, China)

Abstract: Directional thermal radiation of canopy was studied and the related model was set up. According to the mechanism of radiative transfer, 3D canopy scenes were established and the scenes were discretized by differential cells. According to the observed geometric parameters, the radiative transfer of scatter and emission for every internal cell and among cells was calculated. Finally, the directional thermal radiation of canopy could be retrieved from the integral calculation of all differential bodies in the hemisphere. The existing in-situ data were used to test the 3D radiative transfer model and the simulating results. The correlation coefficients are 0.91 and 0.79, the RMSE are 0.4K and 0.6K, respectively. The results show that the model is effective and it can improve the precision of temperature inversion and realize component temperature inversion.

Key words: 3D radiative transfer model; directional thermal radiation; differential cell; canopy

引言

从 20 世纪 60 年代开始, 国内外大量测量数据表明, 植被冠层的热辐射有着不可忽略的方向性. Kimes 等人报道了, 当冠层顶层和底层温差为 4K 时, 天顶和水平观测方向的有效辐射温度差异为 2K^[1]; Balick 等证明落叶林落叶后, 有效辐射温度

有 7K 的角度变化^[2]; Lagouarde 等人发现, 对玉米观测在视角为 $\pm 60^\circ$ 时的亮度温度要比垂直观测时小 4K, 而对深耕裸露土壤视角 $\pm 60^\circ$ 观测的亮度要比垂直观测时高 3.5K^[3]. 此外还有不少学者对草地、小麦、大麦、大豆等多种作物和树冠的热辐射角度效应做了野外观测. 所以, 地表热辐射方向性问题成为阻碍遥感反演地表温度精度提高的主

收稿日期: 2009 - 01 - 06, 修回日期: 2009 - 08 - 12

Received date: 2009 - 01 - 06, revised date: 2009 - 08 - 12

基金项目: 国家自然科学基金 (40901173, 40701119); 国家重点基础研究发展规划“973”项目 (2007CB714401); 国家高技术研究发展计划“863”项目 (2007AA10Z201)

作者简介: 杨贵军 (1976-), 男, 博士, 主要从事定量遥感应用、图像分析处理、3S 集成开发及资源遥感监测等相关技术研究, E-mail: guijun_yang@163.com.

要障碍^[4~6]。

实际上,红外辐射温度反映了作物-土壤系统的一种混合通量,与很多因素相关(Sobrinho, et al 1990a),包括地面要素(冠层结构,温度,光学属性)、大气要素和观测要素,具有明显的方向特征。这些要素之间相互作用,与红外辐射存在非常复杂的非线性关系。在已知上述要素的基础上,方向亮温模型便可以正向模拟出红外辐射,搭建起生物参数和红外辐射观测的关系桥梁,是有效的研究工具。近年来,国内外学者围绕热红外辐射方向性建模开展了大量工作,较为成熟的热辐射方向性模型有两大类:几何投影模型和辐射传输模型。几何投影模型^[1]利用植被冠层的结构特征,通过考虑不同视角下的组分比例来估计方向热辐射,能够较好地刻画地物的辐射方向性。但其不足在于为了得到表面亮度温度,需要输入每个组分的亮度温度,而组分亮温通常是难以得到的;此外还不能有效解决多次散射问题。辐射传输模型认为传感器接收到的辐射温度是传感器的观察方向上叶片的温度分布和倾角分布的函数。辐射传输模型能模拟地表冠层内部来自于组分或者大气的热红外辐射的传输和交互^[7,8]。辐射传输模型适合于水平分布均匀的冠层,对空间分布不连续的冠层则失效。针对具有空间分布规律但不连续的情况,陈良富等曾对行播结构的作物热辐射方向性做过系统的分析^[9],重点考虑了太阳光照方向和观测方向上垄内孔隙率,建立了行播作物的孔隙率模型。此外,Qin等研究通过计算机模拟来表达复杂的辐射传输过程,建立了计算机真实结构模型(RGM),用于短波太阳辐射分布与BRDF的模拟^[10,11]。在此基础上Liu等将其进行扩展到热红外,模拟方向亮温分布^[12,13]。由于计算和模拟方法都是基于光线追踪实现,在热红外波段应用光子追踪具有一定的争议性。

总体来看,现有的热辐射方向性模型大多基于2D水平均匀假设建立,均是针对典型情况建立,不具普适性;所以,发展能够同时考虑冠层3D空间分布特征且基于辐射传输模型计算散射、反射和发射的热辐射方向性模型成为关键。本文给出了以“微分体元”为辐射传输计算基准的三维辐射传输计算方法,并利用已有地表观测数据对模拟出的冠层热辐射方向进行了验证。

1 3D 辐射传输模型概述

遥感像元对应的地表状况通常是非均一的,而

目前大多数辐射传输模型还是基于地表均匀分布建立的,并不能适合复杂地表条件下的辐射传输计算。通过建立三维的地表场景,将场景划分为平行排列的若干“微分体元”,采用扩展的核驱动模型和离散纵坐标法进行有限观测方向、连续传输路径下微分体元的辐射传输求解和积分运算,最终完成整个3D场景的方向性辐射模拟^[11]。下面分别给出了3D辐射传输模型原理和发射辐射的计算方法。

1.1 模型基本原理

通常在热红外波段,对来自太阳的单次和多次散射均可忽略不计,仅考虑热红外辐射在介质中发生的发射、吸收和散射过程,则单色波长辐射通量密度 $I(\omega, \text{sr}^{-1})$ 在三维介质中, r 处沿 Ω 方向传播 $d\tau$ 后的变化量为:

$$\begin{cases} \frac{dI(\Omega, r)}{d\tau} = \left[-\mu_a(\Omega, r) + \mu_s(\Omega, r) \right] I(\Omega, r) \\ \quad + \int_{\Omega'} \mu_s(\Omega', r) I(\Omega', r) d\Omega' \\ \quad + L_B(\Omega, r, T) \end{cases}, \quad (1)$$

方程右边第一项为沿 Ω 方向传输中的辐射通量衰减,为路径吸收和发生的 Ω 到 Ω' 空间散射之和;第二项为 $r+d\tau$ 处来自 Ω' 空间且最终散射到 Ω 方向的多次散射;第三项为介质自身热发射。其中, μ_x, μ_y, μ_z 为 μ 在 x, y, z 三个传输方向上的余弦值; $\mu_a(\Omega, r)$ 、 $\mu_s(\Omega, r)$ 分别为总消光系数、吸收系数(发射系数)和散射系数,单位均为 m^{-1} , $\mu = \mu_a + \mu_s$; $\omega(\Omega, r)$ 为 Ω 方向单次散射反照率, $\omega(\Omega, r) = \frac{\mu_s(\Omega, r)}{\mu_a(\Omega, r) + \mu_s(\Omega, r)}$; $P(\Omega, \Omega')$ 为散射相函数,归一化后存在 $\frac{P(\Omega, \Omega')}{4\pi} = \frac{\mu_s(\Omega, r)}{\mu_a(\Omega, r) + \mu_s(\Omega, r)}$,取决于介质光学特性; $L_B(\Omega, r, T)$ 为发射系数(m^{-1}),根据基尔霍夫定律存在 $L_B(\Omega, r, T) = \omega(\Omega, r) \cdot \epsilon_B(\Omega, r, T)$,介质发射率 $\epsilon_B(\Omega, r, T) = 1 - \omega(\Omega, r)$; $L_B(\Omega, r, T)$ 为黑体辐射($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$); T 为地物温度(K)。

根据离散纵坐标法^[11],将 Ω 空间离散为 N_{dir} 个连续的扇区,每个扇区根据中心立体角 Ω_n 和立体角宽度 $\Delta\Omega_n$ 决定,这样将 Ω 空间上连续的辐射传输计算规划到若干离散扇区上求解,即:

$$\left[-\mu_n \frac{d}{dx} + \mu_n \frac{d}{dy} + \mu_n \frac{d}{dz} \right] \cdot W(\Omega_n, r)$$

$$\begin{aligned}
 &= \cdot (r_n) \cdot W(r_n) \\
 &+ \sum_{m=0}^{N_{dir}} (r_m) \cdot (r_m) \cdot \frac{P(r_m, n)}{4} \cdot W(r_m) \cdot n \\
 &+ B(r_n) \cdot W_B(r_n) \quad (2)
 \end{aligned}$$

其中, $n \in [0, N_{dir}]$, 共 $N + 1$ 个方向, 只要 n 足够小就能满足最终计算结果具有很好精度; $W(r_n) = I(r_n) \cdot n$.

在实际计算时, 通过把复杂场景划分为连续排列的微分体元 $dv = x_i y_i z_i$, 分别对每个体元在 $N + 1$ 个方向上进行辐射传输计算, 最终得到微分体元在所有传输方向上的辐射值; 对来自所有体元相同方向的辐射进行积分或求和, 即可得到场景的热辐射方向性分布. 可以看出离散辐射传输计算的关键是对相函数求解和确定与冠层结构参数、理化参数及光学特性相关的吸收系数. 下面将在 1.2 中详细讨论其计算方法.

1.2 热红外辐射传输计算

微分体元内植被的热辐射传输计算方法如图 1 所示. 微分体元内在给定方向上的发射可以通过对内部微分体元发射辐射求和获得. 在给定植被类型后, 叶片光学特性、体密度、叶倾角等参量可依次确定, 并根据设定的叶片温度和叶片发射相函数, 加入微分体元间的多次散射过程, 可最终求得总辐射; 根据观测方向可确定微分体元的有效出射辐射面积, 确定各微分体元的方向性热辐射.

1.2.1 冠层微分体元发射率的确定

冠层微分体元内叶片发射率 f_{t} 可以定义为朗伯体、Fresnel 反射和 Hapke 方向性模型的组合, 主要包括以下几种类型^[11-15]: 1) 朗伯体, $f_{t} = 1 - \lambda_{amb}(T)$, $\lambda_{amb}(T)$ 为冠层在温度为 T 时的微分体元反射率, 与波长无关; 2) 朗伯体 + Fresnel 反射, $f_{t} = 1 - \lambda_{amb}(\lambda, T) - spe_{dh}(\lambda, \nu)$, $\lambda_{amb}(\lambda, T)$ 为随波长变化的反射率, $spe_{dh}(\lambda, \nu)$ 为 Fresnel 反射率, ν 为观测立体角; 3) Hapke + Fresnel 反射, $f_{t} = 1 - Hapke - spe_{dh}(\lambda, \nu)$, Hapke 模型使用 9 个参数来定义平面随机分布粒子光学特性; 4) 扩展 Hapke + Fresnel 反射, $f_{t} = 1 - Hapke - spe_{dh}(\lambda, \nu)$, $Hapke$ 为扩展的 Hapke 模型, 使用 12 个参数来定义.

1.2.2 微分体元热红外辐射计算

根据式 (2), 单个微分体元 dv 内沿 ν 方向发射辐射传输计算为:

$$dW_{ij}(\lambda, \nu, T) = B(r_n) \cdot W_B(r_n)$$

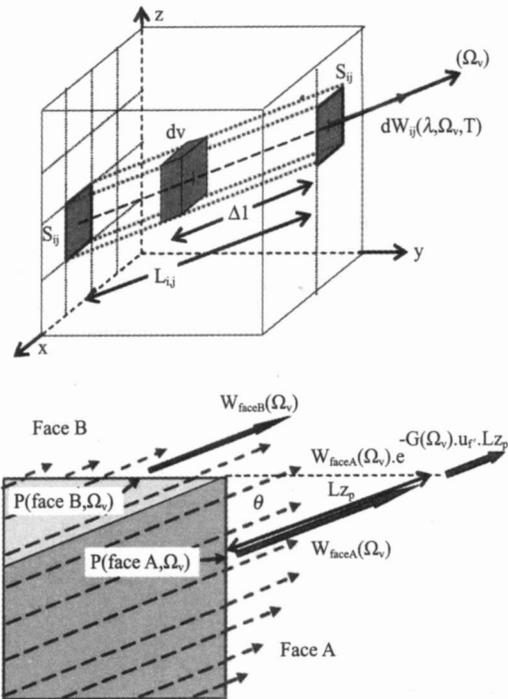


图 1 “微分体元”内热辐射传输过程示意图

Fig 1 The process of thermal infrared radiative transfer in differential cell of 3D scene

$$\begin{aligned}
 &= L_{B,f}(\lambda, T) \cdot G(\lambda, \nu) \cdot u_f \cdot \nu \cdot \exp[-G(\lambda, \nu)] \\
 &\quad \cdot u_f \cdot I(dV) \cdot dV \\
 &= L_{B,f}(\lambda, T) \cdot \cos(\theta_{nv}) \cdot \nu \cdot [1 - \exp[-G(\lambda, \nu)]] \cdot u_f \\
 &\quad \cdot L_{ij} \cdot S_{ij} \quad (3)
 \end{aligned}$$

其中, $V(K, \nu)$ 为微分体元沿 ν 方向穿过 K 侧面辐射; $L_{B,f}(\lambda, T)$ 为叶片发射辐射, $L_{B,f}(\lambda, T) = f_{t} \cdot L_B(\lambda, T)$, $L_B(\lambda, T)$ 为叶片在波长 λ 处温度 T 时的黑体辐射; θ_{nv} 为 ν 与微分体元侧面 K 法线间的夹角; u_f 为 LA 体密度; S_{ij} 为微分体元 K 侧面上单位截面面积, (i, j) 代其所处平面位置. 体密度直接和 LA 空间分布相关, 由冠层的高度、位置、冠层形状及叶倾角分布决定, 即:

$$u_f[l] = \frac{LA[l] \cdot DX \cdot DY}{X \cdot Y \cdot Z \cdot \int_0^l \int_0^y w[j, l] \cdot w[j, x(l), y(l)] \cdot dl} \quad (4)$$

$w[j, l]$, $w[j, x(l), y(l)]$ 分别为叶片的水平和垂直分布, l 为冠层高度; j 为微分体元类型 (叶片、树干或冠层); 而微分体元相函数为:

$$P(s, \nu) = \frac{g_f(j, \nu)}{4} \cdot \int_0^{\pi} f(j, s, \nu) \cdot d_f$$

$$G(j_s) = \frac{1}{2} \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} g_f(j_f) |s \cdot f| \Phi_f \cdot d\Omega_f \quad (5)$$

其中, $G(j_s)$ 为微分体元内所有叶片在 s 观测方向上的投影系数, $g_f(j_f)$ 为叶倾角分布函数, 包括椭圆形、喜直形和喜平形等; $f(j_f, s, v)$ 为叶片散射特性函数, 由朗伯体、Fresnel 反射和 Hapke 方向性模型组合确定, f 是叶片立体倾角; s, v 分别为入射角度和观测角度。

对于微分体元 6 个面来说, 从任意一个面 K 出射的辐射应为:

$$W_{1\text{face } k}(v) = \int_{i_j} dW_{ij}(v) = L_{B,f}(T) \cdot \cos(\theta_{nv}) \cdot v \cdot \int_{i_j} [1 - \exp\{-G(v) \cdot u_{f,t} \cdot L_{ij}\}] \cdot S_{ij} \quad (6)$$

如果微分体元内有多种植被类型, 数目记为 t , 设 $t \in [1, T]$, 则侧面 K 处全部出射辐射为:

$$W_{1\text{face } k}(v) = \frac{L_{B,f}(T) \cdot G_t(v) \cdot u_{f,t}}{G_t(v) \cdot u_{f,t}} \cdot \cos(\theta_{nv}) \cdot v \cdot \int_{i_j} \left\{ V_{cell} \cdot \frac{\cos \theta_{nv}}{G_t(v) \cdot u_{f,t}} \cdot [1 - \exp\{-G_t(v) \cdot u_{f,t} \cdot L_{ij}\}] \cdot S_{ij} \right\} \quad (9)$$

如果考虑 4 空间上多次散射总消光贡献, 则有:

$$W_{int}(v, T) = \sum_{v=0}^{N_{dir}} W_{int}(v, v, T) \quad (10)$$

而多次散射则是关于单次散射的等比数列之和, 即:

$$W_M(v, T) = W_{int}(v, T) \cdot \{ \langle T \rangle + \langle T \rangle \cdot [1 - \langle T \rangle] + \langle T \rangle \cdot [1 - \langle T \rangle]^2 + \dots \} \quad (11)$$

所以微分体元内多次散射总和为:

$$W_M(v, T) = \left[\frac{\langle T \rangle}{1 - \langle T \rangle} \right] \cdot W_{int}(v, T) \quad (12)$$

其中, $\langle T \rangle$ 为以微分体元中心为原点、 $(N_{dir} + 1)$ 个方向上的平均透过率, $\langle T \rangle = \frac{1}{4} \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} \exp\{-G(v) \cdot u_{f,m}(v) \cdot d \cdot m(v)\} \cdot d \cdot m(v)$ 为沿 v 方向微分体元中心到侧面的路径长度. 当微分体元内有多种叶片类型时, 则全部叶片的单次散射反照率、平均透过率和观测方向投影系数分别为:

$$\rho = \frac{f_t \cdot u_{f,t}}{u_{f,t}}, \quad T = \langle T \rangle, \quad G(v) = \sum_t G_t(v) \cdot u_{f,t}$$

为了统计冠层热辐射的方向性, 需要将多次散

$$\int_{i_j} [1 - \exp\{-G_t(v) \cdot u_{f,t} \cdot L_{ij}\}] \cdot S_{ij} \quad (7)$$

对微分体元的其它 5 个侧面进行同样 v 方向上的热红外辐射计算, 然后依次进行相邻微分体元相同方向上的热红外辐射计算, 经过累加求和最终得出冠层顶部 v 方向辐射总和。

2.2.3 微分体元散射辐射计算

实际上, 对于微分体元侧面 K 出射辐射还应包括微分体元内部产生的单次和多次散射辐射贡献. 微分体元内部叶片沿 v 方向的单次散射消光为:

$$W_{int}(v, v, T) = L_{B,f}(T) \cdot G(v) \cdot u_{f,t} \cdot v \cdot \left\{ V_{cell} \cdot \frac{\cos \theta_{nv}}{G(v) \cdot u_{f,t}} \cdot [1 - \exp\{-G(v) \cdot u_{f,t} \cdot L_{ij}\}] \cdot S_{ij} \right\} \quad (8)$$

其中, V_{cell} 为微分体元大小. 式 (8) 表示微分体元总消光与 v 方向消光截面之差, 即为其它方向单次散射消光的总和. 同样, 如果微分体元内部有多种叶片类型, 则单次散射截获总辐射为:

射辐射按照辐射传输方向列出, 多次散射在 4 空间分布为:

$$W_M(v, v, T) = W_M(v, T) \cdot \frac{TG(v) \cdot v}{\sum_{v=0}^{N_{dir}} TG(v) \cdot v} \quad (13)$$

其中, $TG(v) = \sum_{i=0}^{N_{dir}} T_{diff}(i, v) \cdot G(i) \cdot v$,

$$T_{diff}(i, v) = \frac{P(s, v)}{4} \cdot d \cdot v$$

同样考虑微分体元内多种植被类型时, 则方向性散射为:

$$W_M(v, v, T) = W_M(v, T) \cdot \frac{TG_T(v) \cdot u_{f,t} \cdot v}{\sum_{v=0}^{N_{dir}} TG_T(v) \cdot u_{f,t} \cdot v} \quad (14)$$

通常情况下沿任意方向 v 只能看到微分体元的 3 个侧面, 所以单个观测方向上的有效多次散射为:

$$W_M(v, v, T) = \sum_{k=1}^3 W_{M,k}(v, v, T, k) \quad (15)$$

综上完成了一个微分体元在给定 v 方向的发射和多次散射计算, 对场景中所有微分体元进行同样计算后可以得到各微分体元 6 个面上辐射在 4 空间的方向性分布, 然后按照预先设定的 $(N + 1)$ 个扇区对相同观测角 v 的辐射分量求和, 得到半球空间

的三维场景热辐射结果. 当计算的辐射分量连续穿过两个微分体元的增量小于给定阈值时 ($\epsilon = 0.0001$), 当前辐射分量计算结束, 然后进行下一个传输方向的辐射计算. 所以, 3D 辐射传输模型的思路是以微分体元的辐射方向性为基础, 在空间上进行积分后得到整个场景的方向性热辐射.

2 冠层方向性亮温模拟

基于上述微分体辐射传输模型, 按照以下步骤计算场景热辐射方向性: 1) 基于场景模板或者直接编辑生成地表三维场景, 并为场景中的植被冠层设置光谱特性、组分温度及太阳-地物-观测三者间观测几何参数等; 2) 模型场景大小及空间分辨率设置, 将场景划分成连续平行排列的微分体; 由给定的太阳-微分体元-卫星三者间的观测几何开始进行辐射传输计算, 依次计算在各微分体元内部、微分体元之间发生的散射、发射; 3) 在 4 空间上对给定观测方向上的各微分体辐射进行积分运算, 得到场景各像元的热辐射值; 4) 对整个场景进行数值加权运算, 最终得到场景的 BRDF(方向亮温) [16, 17].

2.1 试验数据及 3D 场景建立

为实地验证 3D 辐射传输模型, 采用北京小汤山精准农业基地 (40°11' N latitude, 116°26' E longitude) 的地面试验数据进行验证. 观测目标为均匀种植、灌溉良好的冬小麦, 行播方向为南北方向, 平均行距为 0.15m.

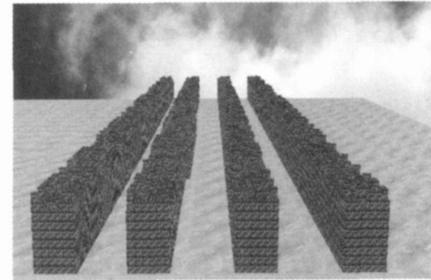
方向亮温 (DBT) 测量: 采用热像仪测量方向亮温. 热像仪在 300K 左右的热敏感度为 0.08K; FOV 为 $18^\circ \times 24^\circ$; 光谱范围为 $7.5 \sim 13.5 \mu\text{m}$, 成像大小为 240×320 像素. 热像仪安装在多角度观测架上, 可以通过旋转或者调整观测架的手臂来改变观测的天顶角, 通过在轨道上移动观测手臂可以改变观测方位角. 这里使用的多角度观测架与 (Chen et al 2002), (Yan et al 2003) 和 (Z. L. et al 2004) 中使用的是同一套仪器. 热像仪固定在手臂的 1.8m 处, 对应的地面视场大小为 $0.6\text{m} \times 0.8\text{m}$, 可以覆盖 5 行左右的小麦. 共测量了四个平面: 太阳主平面, 垂直太阳主平面, 顺垄方向和垂直垄方向. 太阳位置通过当地时间和试验地区的位置计算得到. 我们以 10 为间隔, 在每个平面测量天顶角从 -60 到 60 的热图像. 所有组的测量都选择在天空晴朗, 风速很小的白天, 每一组测量控制在 10min 内, 假设在此时间段内小麦冠层温度变化可以忽略.

表 1 3D 场景输入参数

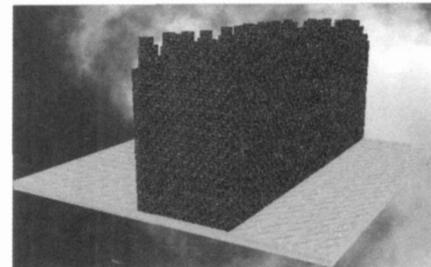
Table 1 The input parameters of 3D scene

日期	行宽 (cm)	行高 (cm)	叶片 温度	叶片 发射率	土壤 温度	土壤 发射率	SZA	SAA	LA1
I 2004-4-1	4.5	8	15.0	0.965	31.0	0.942	44.3°	139°	0.5
II 2004-5-13	15	76	21.5	0.977	38.1	0.953	34.2°	119.8°	4.4

注: SZA 为太阳入射天顶角; SAA 为太阳入射方位角; LA1 为叶面积指数.



(a) 2004-4-1



(b) 2004-5-13

图 2 两个时相冠层三维场景显示

Fig 2 The 3D scene of canopy for two different time

组分温度测量: 叶片和土壤温度则从热像仪图像中人工目视提取, 但需要去除环境辐射贡献, 并根据组分的发射率和 Planck 函数计算得到叶片、土壤的热力学温度 [14]. 叶片和土壤光学特性选择为朗伯体, 参考测量数据和波谱库 [15], 得到叶片发射率和土壤发射率.

冠层结构参数: 通过采样多于 6 株的小麦, 计算叶片的倾角分布、叶片个数、叶基高、叶片宽度等; 通过密度估计可以获得 LA1 植被覆盖度通过垂直下视的可见光数字图像中计算得到. 图 3 为根据地面观测数据 (表 1) 建立的地表三维场景, : 植被覆盖度 0.3; 平均叶倾角 56.5° ; 植株叶片数 3; : 植被覆盖度 0.66; 平均叶倾角 45° ; 植株叶片数 5.

由于采用“微分体元”模式, 真实冠层已经被微分体在三维空间进行离散分解, 在微分体元中隐含了不同冠层结构空间分布, 即各个体元的相函数、叶面积体密度等均不同. 图 2 只是对建立的三维空间场景进行显示, 方便参考真实冠层进行检查, 保证辐射传输计算与场景结构一致.

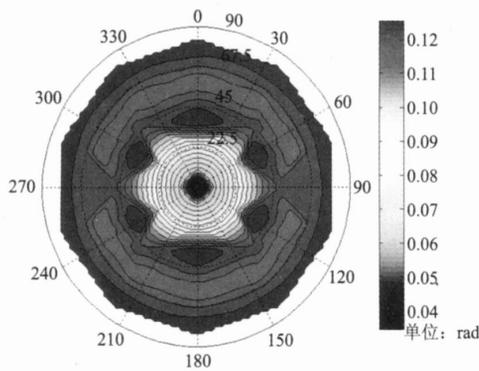


图 3 扇区划分和立体角采样设置
Fig 3 The map of sectors and solid angles configuration

2.2 模拟结果及验证

在实际进行模型计算时,将 4 空间划分为 6 个扇区 ($N_{dir} = 5$),共把 4 空间采样为 111 个立体观测角,采样间隔遵循从天顶角 90 到 0 依次减小,步长为 0.01 rad,如图 3 所示,可以清楚看到 6 个扇区及立体角大小分布情况。

利用实测数据和 3D 模型模拟结果分别绘制了冠层的方向亮温分布图 (图 4)。

同时还对四个主平面进行了统计分析 (太阳入

射主平面、垂直太阳入射主平面、平行垄行平面和垂直垄行平面),得出测量与模拟出的方向亮温趋势、范围基本一致,四个主平面统计相关系数分别为 0.91()和 0.79();均方差分别为 0.4K()和 0.6K()。

另外,由于处于小麦生长拔节期,冠层呈现非连续行播结构分布,所以在保持与太阳入射相同的方位角、天顶角进行观测时,会呈现明显的‘热点’效应,即相同视场内观测到更多的‘光照叶片’和‘光照土壤’;其它观测方向则会观测到更多比例的‘阴影叶片’和‘阴影土壤’;而处于小麦灌浆初期,行播结构特征基本消失,冠层结构近似为水平均匀分布,此时热点效应不明显。所以,无论测量还是模拟结果都很好体现了这一点。

当然模拟结果与实测值也略有差别,相同观测角度下的最大差异为 2K,主要在天顶角较大时。造成的误差不仅来自于 3D 模型本身,测量数据的获取和处理方法也带来一定的误差。通常情况下,由于热像仪视场有限,视场内的不均匀性对测量结果影响较大。采用多角度观测架测量的方向亮温仅仅代表了冠层局部;另外,完成整个多角度测量需要一段

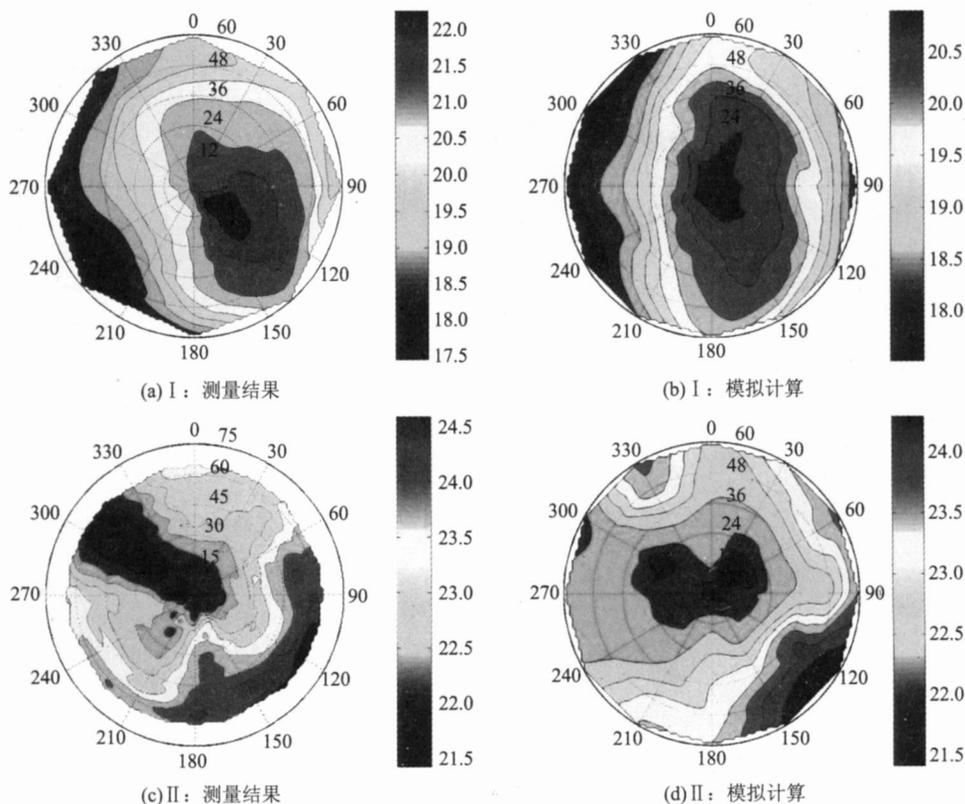


图 4 实测和模拟小麦冠层方向亮温极坐标分布图
Fig 4 The polar maps of simulated and measured DBT of wheat canopies

时间,而在此期间冠层的温度是随时发生变化的,导致各个角度的观测值存在时间不一致性.土壤温度分布非常复杂,测量中标准差可以达到 0.5K至 1.6K叶片温度也存在梯度,大约有 0.5K的变化.

3 结论

通过建立三维场景,并将场景划分为若干平行排列的“微分体元”,进行逐个体元内部的发射、多次散射计算,进而得到场景各个体元的辐射方向性和整个场景加权的辐射方向性.

理论上体元的空间分辨率可以达到 1cm ~ 1000m,将为热辐射方向性的空间尺度效应研究提供有力支撑条件.另外,模型中详细地考虑了冠层的三维结构特征及空间分部,并对场景中各个组分的光学特性、温度分布加以充分考虑,能够准确地模拟出整个冠层的热辐射方向性.将模型模拟结果与实测数据进行分析,相关系数分别为 0.91()和 0.79(),均方差分别为 0.4K()和 0.6K().

当然,由于实测数据有限,目前模拟结果和实测数据还存在一定差异,需要进一步增加观测数据,进行更为详细的验证和分析.此外,针对混合像元场景模拟需要研究合适的方法进行分析和验证.另外需要完善测量数据处理方法,消除多角度观测时的时间不一致性.

由于模型主要考虑辐射传输过程,对于热红外复杂的辐射平衡或热交换过程基本没有考虑.为实现精确的辐射方向性模拟,需要加入能量平衡或辐射平衡相关模型.此外,考虑通过耦合作物生长相关模型,能够模拟出作物整个生长期内的热辐射方向性,并利用模型进行空间尺度效应分析与验证,这些都将在后续研究工作中逐步完善.

REFERENCES

- [1] Kimes D S. Effects of vegetation canopy structure on remotely sensed canopy temperatures[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1980, **10**: 165—174.
- [2] Balick L E, Hutchinson B A. Directional thermal infrared exitance distributions from a leafless deciduous forest[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1986 (24): 693—698.
- [3] 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.
- [4] Chehbouni A, Nouvelon Y, Kerr Y H, et al. Directional effect on radiative surface temperature measurements over a semiarid grassland site[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, **76**: 360—372.
- [5] CHEN Liang fu, FAN Wen jie, L U Qin huo. The study on the thermal infrared radiant directionality of non isothermal land surface. *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): 261—267.
- [6] L U Qiang, CHEN Liangfu, L U Qin huo, et al. A Radiation transfer model to predict canopy radiation in the thermal infrared band[J]. *Journal of Remote Sensing* (刘强, 陈良富, 柳钦火, 等. 作物冠层的热红外辐射传输模型. *遥感学报*) 2003, **7** (3): 161—167.
- [7] Sobrino J, Caselles V. Thermal infrared radiance model for interpreting the directional radiometric temperature of a vegetative surface[J]. *Remote Sens Environ*, 1990, **33**: 193—199.
- [8] Verhoef W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SA L model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1984, (16): 125—141.
- [9] CHEN Liangfu, L U Qin huo, FAN Wen jie, et al. A bi-directional gap model for simulating the directional thermal radiance of row crops[J]. *SCIENCE IN CHINA (D: EARTH SCIENCES)*, 2002, **45** (12): 1087—1098.
- [10] Qin W, Gerstl S A W. 3-D scene modeling of semidesert vegetation cover and its radiation regime[J]. *Remote Sens Environ*, 2000, **74**: 145—162.
- [11] Hapke B. *Theory of Reflectance and Emissance Spectroscopy* [M]. New York: Cambridge University Press, 1993.
- [12] Gastellu-Etchegorry J P, Martin E, Gascon F. DART: a 3D model for simulating satellite images and studying surface radiation budget [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, **25**: 73—96.
- [13] Liu Qin huo, Huang Huaguo, Qin Wen han, et al. An extended 3-D radiosity-graphics combined model for studying the thermal-emission directionality of crop canopy[J]. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 2007, **45** (9): 2900—2918.
- [14] Li Z L, Becker F. Feasibility of land surface temperature and emissivity determination from AVHRR data[J]. *Remote Sens Environ*, 1993, **43**: 67—85.
- [15] Xiao Q, L U Q, L I X, et al. A Field measurement method of spectral emissivity and research on the feature of soil thermal infrared emissivity [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2003, **22**: 373—337.
- [16] YANG Guijun, L U Qin huo, HUANG Huaguo, et al. Methods for simulating infrared remote sensing images based on scene models[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杨贵军, 柳钦火, 黄华国, 等. 基于场景模型的热红外遥感成像模拟方法. *红外与毫米波学报*), 2007, **26** (1): 1—7.
- [17] YANG Guijun, L U Qin huo, L U Qiang, et al. Adjacency effect analysis in imaging simulation of high-resolution mid-infrared (3 ~ 5 μ m) remote sensing[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杨贵军, 柳钦火, 刘强, 等. 高分辨率中红外遥感 (3 ~ 5 μ m) 成像模拟中邻近效应分析. *红外与毫米波学报*), 2008, **27** (3): 233—240.