

## 扩展 CUPID 模型模拟土壤组分温度分布

黄华国<sup>1</sup>, 辛晓洲<sup>1,2</sup>, 柳钦火<sup>1</sup>, 刘 强<sup>1</sup>, 陈良富<sup>1</sup>, 李小文<sup>1,2,3</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. 北京师范大学遥感与地理信息系统研究中心, 北京 100875; 3. Department of Geography and Center for Remote Sensing, Boston University, Boston MA 02215 USA)

**摘 要:** 为模拟详细的温度分布信息, 进一步理解地表能量平衡过程, 提高植被冠层温度反演精度, 根据土壤阴影表面和光照表面的热源和蒸发速率的差异, 扩展了 CUPID 模型, 实现了光照和阴影土壤组分温度分布模拟。采用实测数据分别对冬小麦和夏玉米冠层下的土壤组分温度进行了模拟和验证。在冬小麦地, 模拟光照和阴影土壤温度绝对差值为 2.8 K 和 2.4 K, 平均差值为 -1.5 K 和 -0.7 K; 在夏玉米地, 模拟与实测温度绝对偏差为 3.8 K 左右, 平均偏差为 -0.5 K。总体来说, 模拟与实测数据吻合较好, 说明扩展模型能够较为真实地反映土壤组分温度分布及其变化。扩展模型可在组分温度反演和农业旱情监测等领域得到应用。

**关键词:** 扩展 CUPID 模型; 土壤组分温度分布; SVAT 模型; 模拟

**中图分类号:** TP391.9; S152.8

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2007)1-0139-07

黄华国, 辛晓洲, 柳钦火, 等. 扩展 CUPID 模型模拟土壤组分温度分布[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1): 139-145.

Huang Huaguo, Xin Xiaozhou, Liu Qinhuo, et al. Modeling soil component temperature distribution by extended CUPID model[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(1): 139-145. (in Chinese with English abstract)

### 0 引 言

土壤温度是影响作物生长和发育的重要因素。在农业生产中, 通过对土壤温度的调节可以改善作物的生长环境<sup>[1]</sup>。采用多角度热红外测量植被冠层方向辐射温度, 可以同时反演土壤表层温度和植被温度<sup>[2]</sup>, 是估计植被水分胁迫和生长状况的重要手段<sup>[3-5]</sup>, 对指导田间灌溉, 地表覆盖等措施有重要意义。然而, 由于角度之间的高度相关性, 反演精度还有待提高<sup>[6]</sup>。阴影土壤和光照土壤的温度差别在很多试验观测中得到证实<sup>[7]</sup>, 可以作为提取热量平衡参数的重要信息源<sup>[8]</sup>, 如果能够模拟出详细的植被和土壤温度分布, 将有助于分析热红外遥感的成像机理, 促进反演精度的提高, 推动作物干旱监测研究。

土壤-植被-大气传输(Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer, 以下简称 SVAT) 模型详尽地描述了土壤、植被冠层和大气之间的各种过程, 中间参数的输出使它可以很方便地与气候、水文、生态、遥感等模型进行连接<sup>[9]</sup>, 是模拟农作物冠层组分温度的较好选择。SVAT

模型多数为一维(1D)模型<sup>[10]</sup>, 土壤被定义为多层水平均匀系统, 水热在土壤层内垂直移动, 相互影响, 可以同时求解温度和湿度廓线<sup>[11]</sup>。1D 模型简单实用, 但是只能给出每层的土壤平均温度, 不能提供分离的阴影土壤温度和光照土壤温度<sup>[12,13]</sup>。为了模拟在行播作物结构下的土壤温度分布, 出现了二维模型 2DSOIL 模型<sup>[14]</sup>, 它增加了水平方向上的水热运动。然而, 2DSOIL 只是土壤水热模型, 不能给出植被温度。三维模型 Thermo<sup>[15]</sup> 和 DART<sup>[16]</sup> 将土壤划分为若干格网, 采用 ISBA 模型<sup>[17]</sup> 模拟每一个土壤格网的垂直温度分布, 实现土壤三维温度分布。由于 ISBA 模型本身也只是一个 1D 模型, 格网之间没有水热的相互作用, 因此得到的土壤组分温度空间分布也只是一种近似, 仅适用于格网较大的情况。因此, 就田间尺度而言, 尚没有合适的模型, 能够同时给出详细的叶片和土壤温度分布。

考虑土壤阴影和光照表面的热源和蒸发速率差异, 对一维模型做一定的扩展有可能分离光照和阴影土壤温度。但是, 国内外尚没有见到这方面的研究。因此, 本文试图在 1D 模型 CUPID<sup>[18]</sup> 的基础上做一些扩展, 实现土壤组分温度分布的模拟。选择 CUPID 模型的原因, 是它能够详细模拟不同冠层高度不同倾角叶片的温度, 在叶片温度模拟方面较其它 1D 模型有优势。

### 1 CUPID 模型

CUPID 模型是一个综合的一维 SVAT 模型<sup>[18]</sup>。输入冠层结构、叶片光学和生理参数、土壤参数等, 可以预

收稿日期: 2005-12-09 修订日期: 2006-06-02

资助项目: 国家自然科学基金项目(40371087); 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX3-SW-338-2); 973 项目地球表面时空多要素的定量遥感理论及应用(G2000077903)

作者简介: 黄华国(1978-), 男, 湖北荆门人, 博士生, 研究方向为定量遥感。北京 9718 信箱, 100101。Email: hawkhg@263.net

测植被-环境的各种交互作用(图 1)。在农业遥感领域, CUPID 模型将具有良好的应用前景, 已经被应用于作物水分监测<sup>[19]</sup>和热红外遥感理论和应用研究当中<sup>[20]</sup>。CUPID 模型的主要特点如下:

**多层结构:** 属于离散模型, 将土壤-植被-大气垂直连续体分为多个薄层, 以至每一个薄层内的多次散射可以忽略, 仅考虑层间的多次散射。所分薄层可分为四类: 冠层上层(从上边界到冠层顶)、冠层内部层(从冠层顶到冠层底)、土壤上层(从冠层底部到土壤表面)和土壤下层(从土壤表面到土壤下边界)。每类层数可自定义。

**时空尺度:** 适用于较为均匀的农田系统, 它的最小空间尺度是叶片, 每一层的叶片按照 10°间隔被分为 9 大叶倾角类型。最小时间尺度是 15 min, 只要提供足够天数的输入参数, 最大时间尺度几乎没有限制。

**辐射传输:** 分直射辐射和漫辐射两种类型处理。直射光透射遵循指数消光定律, 散射光的透射表示为直射光透射的半球积分。阻截的辐射或被吸收, 或被散射。辐射传输分为 3 个宽波段分别进行: 可见光 VIS(0.4~0.7 μm), 近红外 NIR(0.7~3 μm) 和热红外 TIR(3~60 μm)。VIS 和 NIR 既包含直射, 也包含散射; TIR 只有散射。除了太阳辐射, 在 TIR 波段, 叶片和土壤也作为辐射源。

**温湿度廓线:** CUPID 模型将地上部分的温度计算和土壤内部的水热传输紧密相连, 只需要气象站提供的气象数据作为上边界, 土壤根系部分的土壤温湿度作为下边界, CUPID 模型就可以同时求解出冠层温湿度廓线和土壤温湿度廓线<sup>[21]</sup>。这样做的优势就是土壤表面的温度, 蒸发通量和热通量是通过计算得到的, 而不是输入参数。

## 2 扩展方法与实现

### 2.1 理论基础

#### 1) 双源模型的启示

为了模拟光照和阴影表层土壤的温度, 需要将表层土壤分成两个组分。CUPID 模型本身是一维结构, 每一层土壤只能得到的一个平均温度。如何在一维的结构下分离光照部分和阴影部分呢?

近年来, 为了详细了解异质或者稀疏冠层的水热传输和辐射传输, 提出了很多双源(或者双层)方法。双源是指土壤和植被。按照土壤和植被的排列结构, 可以分成耦合模型和补丁模型<sup>[22]</sup>。耦合模型认为两个源的水热是耦合叠加的。所有层连续交互, 水热只有通过相邻的层才能传输。耦合模型适用于浓密植被。补丁模型认为所有源都是按照马赛克或者补丁式排列, 产生的通量垂直方向互不干扰。补丁模型适用于离散稀疏植被。

对双源模型进行扩展, 产生了结合层状结构和补丁结构的三组分模型<sup>[23,24]</sup>。三组分模型将土壤分为两个组分(暴露土壤, 冠层下土壤)。

借鉴三组分模型的思想, 将 CUPID 模型的垂直分层和表层土壤补丁排列相结合(图 2)。根据直射光照比例划分的两个土壤组分, 按照补丁模型平行处理。这个混合结构与三组分模型结构的区别在于没有裸露土壤。

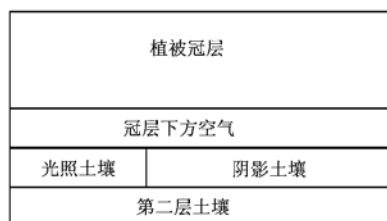


图 2 扩展模型结构

Fig. 2 Extended model structure

#### 2) 土壤组分能量平衡

土壤表面能量平衡方程如下:

$$R_n = H + LE + G \quad (1)$$

式中  $R_n$ ——到达土壤表层所有波段的净辐射通量;  $H$ ——感热通量;  $LE$ ——潜热(蒸发)通量;  $G$ ——土壤热传导通量。光照土壤可以得到太阳直接辐射, 而阴影只能得到天空散射辐射。两者接受的辐射能量不同, 蒸发速度也存在差异, 正确描述这种差异, 就可以分别得到光照和阴影土壤的温度。

两个土壤组分可以根据光照比例来划分。光照比例的计算公式为直射光经过植被阻截后剩下分量与未穿透之前的比值。CUPID 模型的辐射传输模式可以方便地计算出到达土壤表面的直射光、散射光和热辐射等分

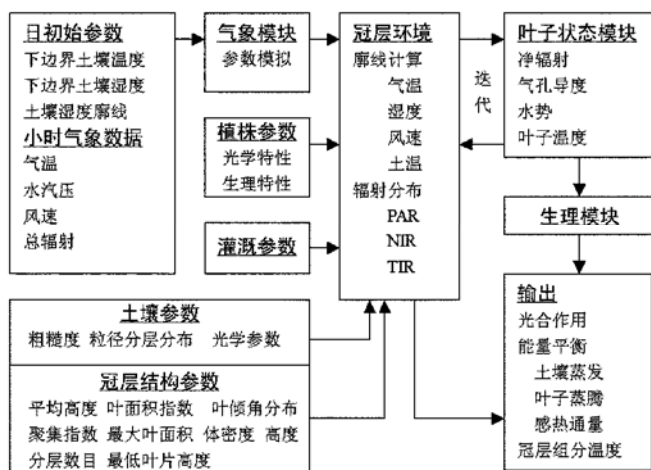


图 1 CUPID 模型框架

Fig. 1 CUPID model framework

量。则阴影土壤面积比例为

$$f_{cover} = 1 - \frac{R_{soil}^{\downarrow}}{R_{toc}^{\downarrow}} \quad (2)$$

式中  $R_{soil}^{\downarrow}$ ——到达土壤的直射光辐射通量;  $R_{toc}^{\downarrow}$ ——冠层顶太阳直射光辐射通量, 假设只有土壤表层存在温度差异, 形成两个组分, 而第 2 层土壤和土壤上方空气的温度均匀分布。光照土壤和阴影土壤分别与下方土壤和上方空气进行水热交换, 互不干扰。该层的感热通量、潜热通量和土壤热通量为两个组分通量的面积加权之和。

表 1 CUPID 模型关键输出变量

Table 1 Key output variables of CUPID model

变量	描述	变量	描述
$R_{net}$	土壤表面净辐射 ( $W \cdot m^{-2}$ )	$K_e$	土壤表层的水汽传导系数 ( $W \cdot m^{-2} \cdot mb^{-1}$ ) <sup>[25]</sup> , 约为 $K_{air}$ 的 0.64 倍
$R_{b,vis}$	到达土壤表面的可见光直射辐射 ( $W \cdot m^{-2}$ )	$\alpha$	土壤表面反射率
$R_{d,vis}$	到达土壤表面的可见光散射辐射 ( $W \cdot m^{-2}$ )	$T_1$	土壤正上方气温 ( $^{\circ}C$ )
$R_{b,nir}$	到达土壤表面的近红外直射辐射 ( $W \cdot m^{-2}$ )	$T_2$	土壤表面正下方温度 ( $^{\circ}C$ )
$R_{d,nir}$	到达土壤表面的近红外散射辐射 ( $W \cdot m^{-2}$ )	$P$	土壤表面水势 (kPa)
$R_{b,tir}$	到达土壤表面的热红外直射辐射 ( $W \cdot m^{-2}$ )	$e_a$	土壤正上方空气水汽压 (mbar)
$R_{d,tir}$	到达土壤表面的热红外散射辐射 ( $W \cdot m^{-2}$ )	$C_p$	表层土壤热容量 ( $J \cdot K^{-1}$ ), 主要由含水量决定
$T_{mean}$	土壤表面平均温度 ( $^{\circ}C$ )	$K_{soil}$	土壤表层的热传导系数 ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ), 是土壤类型和含水量的函数
$T_0$	土壤表面上上一时刻平均温度 ( $^{\circ}C$ )	$\epsilon$	土壤发射率
$K_{air}$	土壤表层空气热传导系数 ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ) <sup>[25]</sup> , 为湍流扩散系数 ( $m^2 \cdot s^{-1}$ ) 和空气体积热容量 (大约 $1200 J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$ ) 的乘积对深度的微分值	$\Delta$	饱和水汽压 - 温度函数的斜率 ( $mbar \cdot K^{-1}$ )

CUPID 模型在每个小时的温湿度廓线求解后, 都可以输出很多中间变量 (表 1)。根据这些已知条件, 分别建立光照组分和阴影组分的能量平衡方程 (下标 “lit” 和 “shd” 分别表示光照和阴影土壤):

阴影土壤能量平衡

$$R_{n,shd} = H_{shd} + G_{shd} + LE_{shd} \quad (3)$$

假定阴影土壤温度为  $T_{shd}$ , 则有

$$H_{shd} = -K_{air}(T_a - T_{shd}) \quad (4)$$

$$LE_{shd} = -K_e \left[ e^*(T_{shd}) e^{\frac{0.018P}{8.314(T_{shd} + 273.15)}} - e_a \right] \quad (5)$$

式中  $e^*(T_{shd})$ ——在温度为  $T_{shd}$  时的饱和水汽压。

$$G_{shd} = -K_{soil}(T_2 - T_{shd}) + c_p(T_{shd} - T_0) \quad (6)$$

$$R_{n,shd} = (R_{d,vis} + R_{d,nir})(1 - \alpha) + \epsilon(R_{b,tir} + R_{d,tir}) - \epsilon\sigma T_{shd}^4 \quad (7)$$

其中  $\sigma$  为 Stephan-Boltzman 常数 ( $5.67 \times 10^{-8} Wm^{-2} \cdot K^{-4}$ )。联立公式 (3) ~ (7) 可以求出阴影土壤温度  $T_{shd}$ 。

光照土壤能量平衡

$$R_{n,lit} = H_{lit} + G_{lit} + LE_{lit} \quad (8)$$

假定光照土壤温度为  $T_{lit}$ , 则有

$$H_{lit} = -K_{air}(T_a - T_{lit}) \quad (9)$$

$$LE_{lit} = -K_e \left[ e^*(T_{lit}) e^{\frac{0.018P}{8.314(T_{lit} + 273.15)}} - e_a \right] \quad (10)$$

其中,  $e^*(T_{lit})$  表示在温度为  $T_{lit}$  时的饱和水汽压。

$$G_{lit} = -K_{soil}(T_2 - T_{lit}) + c_p(T_{lit} - T_0) \quad (11)$$

$$R_{n,lit} = \left[ \frac{R_{b,vis} + R_{b,nir}}{1 - f_{cover}} + R_{d,vis} + R_{d,nir} \right] (1 - \alpha) + \epsilon(R_{b,tir} + R_{d,tir}) - \epsilon\sigma T_{lit}^4 \quad (12)$$

联立公式 (9) ~ (12) 可以求出光照土壤温度  $T_{lit}$ 。可以发现总能量是守恒的:

$$R_{n,lit}(1 - f_{cover}) + R_{n,shd}f_{cover} = R_{net} \quad (13)$$

采用牛顿迭代法可以快速求解土壤组分温度。

## 2.2 扩展实现

在 CUPID 模型原有代码中加入一个新的模块, 实现 2.1 节所描述的过程。该模块不影响原来的任何过程, 放置在小时循环中。采用牛顿拉普森迭代法求解土壤植被连续体温湿度廓线之后, 在输出文件中额外添加阴影比例、阴影土壤温度和光照土壤温度。

## 3 模拟结果验证

### 3.1 田间试验

为了获得模型的输入参数来验证模型土壤组分温度模拟的有效性, 分别采用 2001 年春季在北京顺义冬小麦试验区进行的观测数据和 2005 年夏天在河北怀来夏玉米田间地面试验数据驱动模型并验证。

冬小麦试验地位于北京市顺义区冬小麦种植区 (经纬度  $116^{\circ}34'32.7''$ ,  $40^{\circ}11'40.1''$ ), 面积  $26 \text{ hm}^2$ 。整个试验的持续时间比较长, 经历了小麦返青、拔节、抽穗、灌浆等生长阶段, 期间田间地上特征的变化很快 (主要是叶面积指数和冠层高度的变化), 同时也是一般年份春旱比较严重的时段, 需要灌溉以保证小麦正常生长, 所以土壤水分变化也较快。小麦品种为京 411, 土壤类型为黑黄土 (也称为潮褐土), 根据中国土壤数据库 [http://www.soil.csdb.cn] 所提供相近地点的该土壤类型测量数据参考得到土壤组成。小麦行播方向 N-S, 行距  $0.14 \text{ m}$ 。生长期平均高度从  $0.1 \text{ m}$  到  $0.8 \text{ m}$ ,

叶面积指数(测定方法为干重法辅以叶面积仪) 0.5 到 5.0(单位  $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ ), 早期增长较快, 最大达到 5.0, 从落叶后开始下降。叶倾角大约为  $60^\circ \pm 10^\circ$ 。太阳辐射数据、气温等气象数据直接在田块使用波文比、涡度相关等仪器测得。

玉米试验地位于河北怀来中国科学院遥感应用研究所怀来试验场( $115^\circ 47' 14''$ ,  $40^\circ 21'$ )。在夏玉米的主要生长期(5月到8月)进行观测。土壤类型为砂土, 纹理参数见表 2。行播方向 E-W, 行距 0.46 m, 株距约 0.5 m。由于长期干旱, 玉米种植在垄间沟内, 这样有利于保水。冠层高度从沟表面起算。在每块地取约  $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  的样方, 数玉米株数, 得到单位地表面积的株数, 然后选取 6~10 株玉米, 用量角器测量叶倾角分布后带回。将带回玉米叶片剪下, 粘在水平白板上, 用数码相机拍摄, 采用数字图像处理方法计算叶面积, 最后换算到单位面积的叶面积指数。从怀来气象站获取 5 月至 7 月每两个小时的常规气象数据(缺少太阳辐射数据)。

表 2 CUPID 模型所需土壤参数

Table 2 Main soil parameters of CUPID model

参数名称及其单位	参数值	
	顺义	怀来
Sand 含量/%	65	70
Silt 含量/%	18	20
Clay 含量/%	16	9
土壤表层容重/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.3	0.9
腐殖质	无	无
初始土壤表层水分含量/ $\text{cm}^{-3} \cdot \text{cm}^{-3}$	0.18	0.036
土壤发射率	0.95	0.95

采用红外波谱仪 BOMEN MR 154(加拿大 ABB 公司,  $2.5 \sim 14 \mu\text{m}$ ) 测量组分和大气红外波谱。利用 ISSTES 算法<sup>[26]</sup> 分析土壤的红外波谱得到发射率曲线。由于 CUPID 需要宽波段发射率, 对发射率波谱曲线平均( $8 \sim 14 \mu\text{m}$ ) 可得到土壤发射率(顺义 0.95, 怀来 0.97)。在不同 LAI 条件下, 用 Monte Carlo 方法分析土壤发射率对土壤温度模拟的敏感性, 结果表明土壤发射率不是敏感参数, 因此本文均采用 0.95 作为参考输入值。采用 JM424 数字式点温计(K 型热电偶传感器, 测量值精确到  $0.1^\circ\text{C}$ ) 和 FLIR 红外成像仪(热红外波段  $8 \sim 14 \mu\text{m}$ , 中红外波段  $3 \sim 5 \mu\text{m}$ ) 测量土壤温度, 红外成像仪在实验室内进行了定标。由于使用了国内自主研发的多角度观测架(距离地面约 1.6 m), 热红外成像仪得到的是不同视场角下的组分亮度温度分布数据。由于热辐射方向性的影响, 不同角度下得到的亮度温度会不同。在能同时观测到阴影土壤和光照土壤的条件下, 采用近垂直的热像仪数据获取组分温度来避免角度影响;

采用 FLIR 附带软件(ThermaCAM Researcher Pro 2.7) 配合目视分类求解真实组分温度。使用软件提供的 AOI(感兴趣区域) 工具分别选择光照土壤和阴影土壤, 输入土壤发射率、环境温度、大气温度和相对湿度(默认 50%)、目标与热像仪镜头距离等 4 类主要参数。本文验证所采用的组分温度测量时间为: 2001 年 4 月 3 日~ 4 月 21 日和 2005 年 6 月 3 日。

### 3.2 验证方法

构建包含一个月数据的连续输入文件(最小时间单位为 15 min), 输入初始土壤参数和每天的植被结构参数后运行输出土壤表面平均温度、光照土壤温度、阴影土壤温度以及阴影比例。采用平均绝对偏差(MAE) 和平均偏差(Bias) 描述模拟土壤温度与实际观测的组分温度的差异; 并用散点图描述模拟和实测的相关性。MAE 和 Bias 定义如下

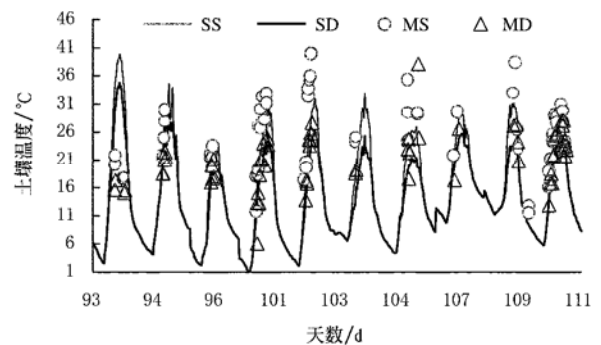
$$MAE = \frac{\sum |T - T^%|}{n}, \quad Bias = \frac{\sum (T - T^%)}{n}$$

式中  $T$ ——模拟温度值;  $T^%$ ——测量温度值;  $n$ ——数据对个数。

### 3.3 结果分析

图 3 显示了顺义地区主要测量日期内(2001 年 4 月 3 日到 21 日)的连续土壤温度模拟数据与测量数据的趋势比较。图 4 显示了怀来地区 2005 年 6 月 3 日土壤温度模拟数据与测量数据的趋势比较。图 5 显示了小麦地所有组分温度测量和预测值的相关关系。图 6 显示了玉米地所有组分温度测量和预测值的相关关系。

从图 3 和图 4 中可以看出, 模拟的土壤温度与实测的组分温度在整体趋势上一致, 吻合很好。顺义数据模拟的光照和阴影土壤温度的 MAE 分别为 2.8 K 和 2.4 K, Bias 分别为 -1.5 K 和 -0.7 K(图 5)。4 月 12 日和



注: SS, SD, MS 和 MD 分别表示模拟光照、模拟阴影、测量光照和测量阴影土壤温度

图 3 模拟和实测土壤组分温度比较(顺义, 2001)

Fig. 3 Comparison between simulated and measured soil temperatures(Beijing, 2001)

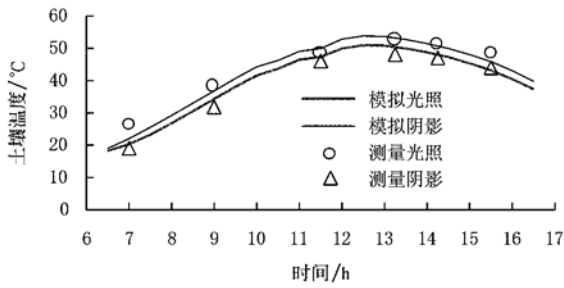


图 4 模拟和实测土壤组分温度比较(怀来, 2005)  
Fig. 4 Comparison between simulated and measured soil component temperatures(Huailai, 2005)

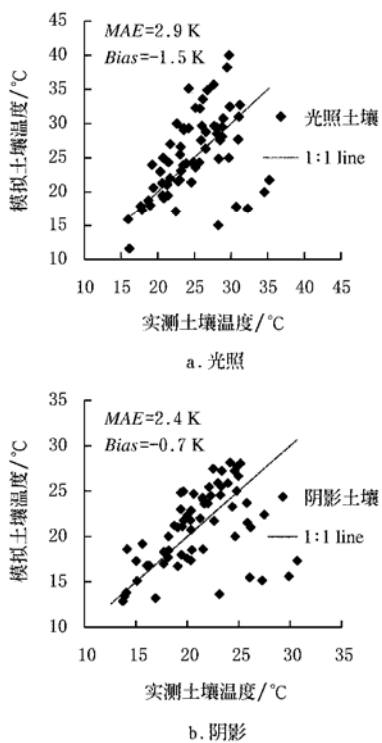


图 5 模拟和实测的光照和阴影土壤组分温度的相关关系(顺义)

Fig. 5 Relationship between simulated and measured soil component temperatures(Shunyi)

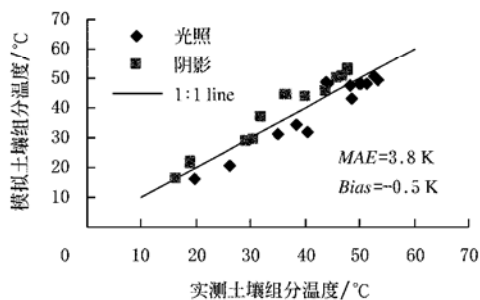


图 6 模拟和实测土壤组分温度的相关关系(怀来)  
Fig. 6 Relationship between simulated and measured soil component temperatures(Huailai)

15 日模拟差异最大, 模拟温度显著高于测量温度, 可能是 12 日的气温测量偏高, 14 日灌溉量输入偏小的缘故。由于怀来试验的主要目的是方向性测量, 空间分布很详细, 而时间分辨率较低, 验证数据不多, 而且多集中在土壤温度最高的正午前后, 将光照土壤和阴影土壤一并进行相关分析, 得到  $MAE$  为 3.8 K,  $Bias$  为 -0.5 K (图 6)。并且, 模拟光照土壤温度偏低, 模拟阴影土壤温度则偏高。 $MAE$  较大可能有以下几个原因:

1) 没有对 CUPID 模型进行严格的定标工作, 会导致一定的系统误差;

2) 气象数据带来的误差: 怀来的太阳辐射数据采用模拟方法得到; 气温、相对湿度和风速等都是每隔 3 h 的数据内插获得; 而且气象站与样地位置差异较大 (约为 20 km);

3) 组分温度测量误差, 可以分为仪器自身误差和数据处理误差两种: 点温度计本身会有 1K 左右的误差; 热像仪测量精度虽高, 然而直接测量到得是组分亮度温度, 包含了环境辐射、大气和组分发射率等多方面的影响, 虽然采用 FLIR 所带软件进行了校正, 但是很难检验校正的精度。另一方面, 土壤粗糙度影响光照土壤和阴影土壤的准确分离。完全光照土壤与部分光照土壤较难区分, 会带来较大误差。

#### 4 结论与讨论

目前, 国内外缺乏能够同时模拟详细植被温度分布和土壤温度分布的机理模型, 很难为多角度热红外遥感机理研究提供更好的支持。本文的研究工作增加了 SVAT 模型和遥感模型的接口(土壤组分温度分布), 使两者结合更加紧密。理论上, 这种扩展方法可以适用于所有类似于 CUPID 模型的 1 维 SVAT 模型。从验证结果看, 扩展 CUPID 模型模拟的土壤温度与实测的组分温度吻合较好(小麦地最大  $Bias$  为 -1.5 K, 最大  $MAE$  为 2.8 K; 玉米地  $Bias$  为 -0.5 K,  $MAE$  为 3.8 K), 反映出了土壤组分温度空间分布和日变化过程。该模型可以作为建模工具, 结合热辐射方向性模型, 更好地理解作物多角度遥感辐射温度, 提高植被冠层真实温度反演精度, 有利于旱情监测。

不过, 该模型还存在以下问题: 1) 光照土壤模拟误差相对较大, 需要在以后的工作进一步考虑部分光照的情形;

2) 模型不适用于非常稀疏的植被冠层, 主要是受限于一维均匀植被的假设。

这些问题都需要在以后进一步解决。同时也需要加强模型在组分温度反演和农业旱情监测等领域得的应用。

## [参 考 文 献]

- [1] 陈素英,张喜英,裴冬,等. 玉米秸秆覆盖对麦田土壤温度和土壤蒸发的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 171- 173.
- [2] 庄家礼,陈良富,徐希孺. 地表组分温度反演[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2000, 36(6): 850- 857.
- [3] Jackson R D, Reginati R J, Idso S B. Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements[J]. *Water Resour Res*, 1977, 13: 651- 662.
- [4] 袁国富,唐登银. 基于冠层温度的作物缺水研究进展[J]. 地球科学进展, 2001, 16(1): 49- 54.
- [5] 袁国富,罗毅,孙晓敏,等. 作物冠层表面温度诊断冬小麦水分胁迫的试验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(6): 13- 17.
- [6] 刘强. 地表组分温度反演方法及遥感像元的尺度结构[D]. 北京:中国科学院遥感应用研究所, 2002.
- [7] Jay M Ham, Kluitenberg G J. Positional variation in the soil energy balance beneath a row-crop canopy [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1993, 63(1- 2): 73- 92.
- [8] 张仁华,苏红波,李召良,等. 地表受光面和阴影温差的潜在信息及遥感土壤水分的新途径[J]. 中国科学(E辑), 2000, 30(增刊): 45- 53.
- [9] 辛晓洲. 用定量遥感方法计算地表蒸散[D]. 北京:中国科学院遥感应用研究所, 2003.
- [10] Corinna Moehren. Literature review of current used SVAT models[R]. UCC Department of Civil & Environmental Engineering, INTERNAL REPORT 04 - 99, 1999.
- [11] Louise Karlberg, Alon Ben-Gal, Per-Erik Jansson, et al. Modelling transpiration and growth in salinity-stressed tomato under different climatic conditions[J]. *Ecological Modelling*, 2006, 190(1- 2): 15- 40.
- [12] Albert OLIOSO, Isabelle BRAUD, André CHANZY, et al. SVAT modeling over the Alpilles-ReSeDA experiment: comparing SVAT models over wheat fields [J]. *Agronomie*, 2002, 22: 651- 668.
- [13] 林忠辉,刘苏峡,莫兴国. 基于SVAT模型的冬小麦光合作用和蒸散过程研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1394- 1398.
- [14] Dennis J Timlin, Yakov A Pachepsky. A modular soil and root process simulator[J]. *Ecological Modelling*, 1997, 94(1): 67- 80.
- [15] Luquet D, Vidal A, Dauzat J, et al. Using directional TIR measurements and 3D simulations to assess the limitations and opportunities of water stress indices [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90: 53- 62.
- [16] Alice Belot, Gastellu-Etchegorry J P, Perrier A. A 3D model of mass and energy transfers in vegetated canopy [A]. Presented at 26th Conference on Agricultural and Forest Meteorology [C]. Vancouver, British Columbia, 2004.
- [17] Noilhan J, Mahfouf J F. The ISBA land surface parameterisation scheme [J]. *Global and Planetary Change*, 1996, 13(1- 4): 145- 159.
- [18] Norman J M. Modeling the complete crop canopy [A]. In: *Modification of the Aerial Environment of Plants*. (Eds. BJ Barfield & JF Gerber) [M]. Michigan: ASAE, 1979.
- [19] Weiss A, Lukens D L, Norman J M, et al. Leaf wetness in dry beans under semi-arid conditions[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1989, 48(1- 2): 149- 162.
- [20] Jia L, Li Z L, Menenti M. Modeling of TIR radiative transfer in the soil-vegetation-atmosphere system: sensitivity to soil water content and LAI and simulation of complex scenes [A]. Presented at IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]. TORONTO, CANADA, 2002.
- [21] Wilson T B, Norman J M, Bland W L, et al. Evaluation of the importance of Lagrangian canopy turbulence formulations in a soil-plant-atmosphere model[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 115(1, 2): 51- 69.
- [22] Lhomme J P, Chehbouni A. Comments on dual-source vegetation-atmosphere transfer models [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 94(3, 4): 269.
- [23] Chehbouni A, Nichols W D, Njoku E G, et al. A three component model to estimate sensible heat flux over sparse shrubs in Nevada[J]. *Remote Sensing Reviews*, 1997, (15): 99- 112.
- [24] Brenner A J, Incoll L D. The effect of clumping and stomatal response on evaporation from sparsely vegetated shrublands [J]. *Agricultural And Forest Meteorology*, 1997, 84(3, 4): 187- 205.
- [25] William P Kustas, John M Norman. Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 94(1): 13- 29.
- [26] Qing Xiao, Liu Qinhuo, Li Xiaowen, 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(5): 373- 37.

## Modeling soil component temperature distribution by extended CUPID model

Huang Huaguo<sup>1</sup>, Xin Xiaozhou<sup>1,2</sup>, Liu Qinhuo<sup>1</sup>, Liu Qiang<sup>1</sup>, Chen Liangfu<sup>1</sup>, Li Xiaowen<sup>1,2,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Center for Remote Sensing and GIS, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Department of Geography and Center for Remote Sensing, Boston University, Boston MA 02215, USA)

**Abstract:** In order to help understand land surface energy balance processes and improve the inversion accuracy of canopy component temperature, an extended CUPID model was proposed to simulate detailed canopy temperature distribution. The extended model can simultaneously simulate the shaded and sunlit soil temperature based on the difference of net radiation and evaporation rate between the shade and sunlit soil. The field-measured data on winter wheat and summer corn were used to validate the model. In winter wheat field, the mean absolute errors were a little higher (2.8 K and 2.4 K) than the mean errors (-1.5 K and -0.7 K) between simulated and measured soil temperatures for sunlit part and shaded part of soil respectively. In the corn field, the mean absolute errors were much higher (3.8 K) than the mean errors (-0.5 K) between simulated and measured soil temperatures. As a whole, these results showed that the extended CUPID model could correctly simulate the spatial distribution and diurnal variation of the soil component temperature. The model can be applied to component temperature inversion and agricultural drought monitoring.

**Key words:** extended CUPID model; soil component temperature distribution; Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer (SVAT); simulation