

文章编号: 1007 4619(2007)01 0094 09

用 CUPID 模型模拟小麦组分温度分布: 敏感性分析与验证

黄华国¹, 辛晓洲^{1,2}, 柳钦火¹, 陈良富¹, 李小文^{1,2,3}

(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 MA02215 USA)

摘 要: 组分温度分布是决定农作物冠层热红外辐射方向特性的重要因素之一, 为了分析小气候参数对冠层组分温度的影响, 并分析其不确定性, 对一个典型的土壤-植被-大气传输 (SVAT) 模型 CUPID 进行了组分温度模拟的敏感性和不确定性分析, 并用实测温度分布信息进行了验证。详细描述了模拟和验证过程, 结果表明: 土壤组分温度不确定性较大, 冠层组分温度不确定性较小 (约 2%), 气温和土壤湿度对总体不确定性贡献最大; 模拟组分温度与实测温度分布趋势一致。

关键词: 敏感性分析; 不确定性分析; 温度廓线; SVAT; 组分温度模拟

中图分类号: TP79 文献标识码: A

Using CUPID to Simulate Wheat Canopy Component Temperatures Distribution, Sensitivity Analysis and Evaluation

HUANG Hua guo¹, XIN Xiao zhou^{1,2}, LU Qin huo¹, CHEN Liang fu¹, LI Xiao wen^{1,2,3}

(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 MA02215 USA)

Abstract The sensitivity analysis and validation of a SVAT (Soil-vegetation-atmosphere transfer) model (CUPID) are carried out to identify the parameters of CUPID with the largest influence on canopy component average temperatures and temperature profiles. The simulation process and field experimental designs are presented in detail. The results show that the overall uncertainty of the soil temperatures is unstable during growing season, while the uncertainty of canopy temperature stays at about 2%; air temperature and soil water content are the two biggest error contributors. It is found by evaluation that the trend between simulated and measured temperatures is consistent.

Key words sensitivity analysis; uncertainty analysis; temperature profiles; SVAT; component temperature simulation

1 引 言

热红外辐射方向性建模和组分温度反演近几年

来一直是热红外遥感的重要研究课题。然而, 目前热红外多角度遥感数据源还较少, 不同角度之间存在较强的相关性, 组分温度反演不确定性较大^[1]。探讨使用 SVAT (Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer)

收稿日期: 2005-09-14 修订日期: 2006-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 40371087); 中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (编号: 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 (编号: G2000077903) 资助。

作者简介: 黄华国 (1978—), 男, 中国科学院遥感应用研究所攻读博士生, 研究方向为定量遥感。

模型模拟组分温度分布, 支持热辐射方向性研究, 促进地表温度遥感反演精度的提高, 将是重要的研究方向。

SVAT 模型详尽描述了土壤、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。CUPID 模型^[2]是其中的典型代表, 它可以模拟出不同冠层高度不同倾角叶子的温度, 其详细程度是很多同类模型无法达到的。Nomann 曾经对 CUPID 进行了系统的分析^[2,3], 认为 CUPID 完全可以作为实用工具来分析生长植被与环境的关系, 不过没有对组分温度模拟进行敏感性分析和系统验证。Inckina 等 (1995) 从文献和地面观测所得输入参数, 对彭曼公式、大叶模型和 CUPID 的通量与表面温度进行比较, 模拟结果显示 CUPID 吻合最好^[4]。Jia Li 曾经针对 LAI 和土壤水分两个输入参数与输出方向亮温 (DBT) 之间的关系, 采用 CUPID 模型进行过敏感性分析, 为红外图像仿真提供了指导^[5]。由于上述研

究应用 CUPID 模型的目的不一样, 主要集中在通量模拟的验证上, 而对于组分温度分布的模拟不确定分析和验证工作较少, 且没有对组分温度分布模拟进行敏感性分析和系统验证。

本文将集中对其进行参数的敏感性分析, 找出最能影响组分温度分布的参数; 并进行不确定性分析和验证, 为后续遥感应用打下坚实基础。

2 CUPID 模型简介

CUPID 模型是一个综合的一维土壤-植被-大气传输模型^[2], 利用输入参数, 包括冠层结构 (高度、叶倾角分布和叶面积指数等)、叶片物理参数 (反射率、透过率和发射率等)、叶片生理参数 (光合作用、气孔传导和呼吸作用等)、土壤参数 (土热和水分等) 和边界条件 (冠层上方和土壤底部), 来预测植被-环境的各种交互作用。CUPID 模型的流程见图 1。

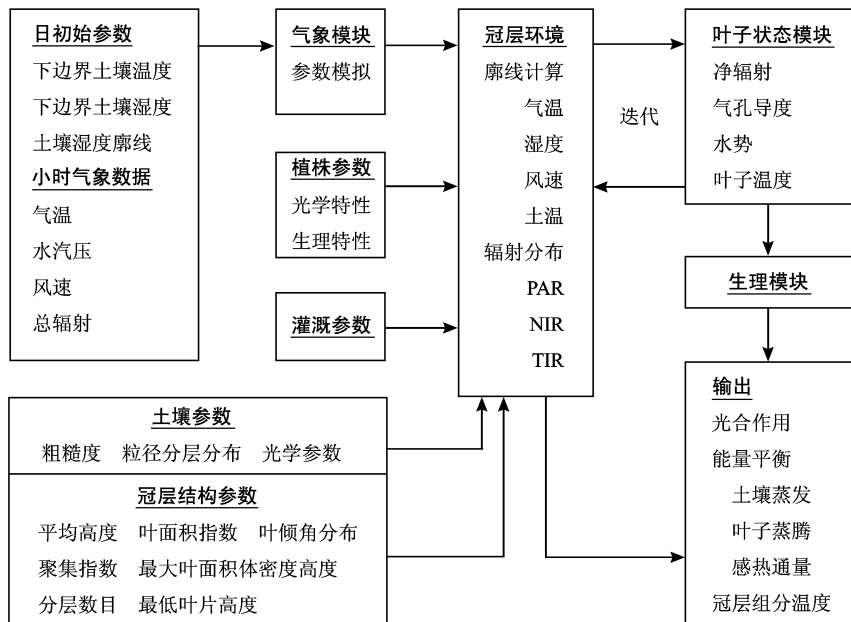


图 1 CUPID 模型流程图

Fig. 1 Flow chart of CUPID

CUPID 的潜在遥感应用价值在于: (1) 针对实测数据缺乏的现状, 可以通过大量的数值模拟, 探求影响植被冠层组分温度的主要因素, 积累先验知识, 提高组分温度反演的精度; (2) 可以为热辐射方向性研究提供较为可靠的温度分布信息; (3) 可以通过模型同化的方法, 得到土壤水分等信息; (4) 可以耦合到辐射传输模型中, 进行热红外遥感图像仿真,

促进传感器研究。因此, 在遥感领域, CUPID 模型具有良好的应用前景。已经被应用于作物水分监测、热红外遥感理论和应用研究当中^[5,6]。

由于输入参数较多, 每个参数的不确定性都会影响输出组分温度的不确定性; 另外, 由于模型集成了能量平衡、辐射传输及光合作用等子模型, 这些模型本身就有误差和不确定性, 也会影响到输出组分

温度的不确定性。下文将对输入参数的敏感性和不确定性进行详细分析,并对总体不确定性进行评估和验证。

3 研究地区和地面实验

2001年春天(2001年4月1日到5月19日)以北京顺义为主要试验区,开展了北京星—机—地定量遥感综合实验^[7],然后利用实验期间获得的数据,分析CUPID模型的模拟组分温度的敏感性、不确定性,并验证模型组分温度模拟的有效性。

选取的实验地区位于北京市顺义区冬小麦种植区(东经 $116^{\circ}34'$,北纬 $40^{\circ}11'$)。实验按田块分别观测,本文选用NW4和NW5田块的测量数据验证,每块面积大约为 26m^2 。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.csdh.cn/>]所提供的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 0.15m 。实验期间,冠层平均高度从 0.1m 生长至 0.8m ,叶面积指数(测定方法为干重法辅以叶面积仪)从 0.5 到 5.0 (单位 m^2m^{-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 $60^{\circ}\pm 10^{\circ}$ 。

小麦叶片和土壤的组分发射率曲线采用BOMEN红外波谱仪($0.7\text{--}19.5\mu\text{m}$,最高光谱分辨率 1cm^{-1})测量红外波谱并结合SSTES算法得到^[8]。对 $8\text{--}14\mu\text{m}$ 波段范围的发射率曲线取平均近似作为宽波段发射率,得到叶片发射率 0.970 土壤发射率 0.955 ,作为CUPID模型的输入参数。

组分温度测量选用天津立文电子有限公司产的M424M便携式数字温度计,传感器为K型热电偶点温计,精度为 $\pm 0.5\%$,测温范围为 $-50\text{--}200^{\circ}\text{C}$;手持AGA Thermopoint 80红外辐射计,测温范围 $-30\text{--}167^{\circ}\text{C}$,测量值精确到 0.1°C 。尽管由于接触式温度测量会破坏局部热平衡,测量得到的温度误差会较大,但是已经足够反映出模拟组分温度与实测温度的趋势。红外辐射计测量得到的温度不仅是发射率的函数,也与环境辐射的反射有关(公式(1)),需要校正后使用。

$$B_{\lambda}(T_B) = (1 - \epsilon_{\lambda})L_{\lambda}^{\downarrow} + \epsilon_{\lambda}B_{\lambda}(T_R) \quad (1)$$

野外测量时的环境辐射主要是天空的大气下行辐射,用BOMEN同步进行了测量。从测量值中扣除下行辐射项,再除以组分比辐射率就得到组分真实辐射通量,然后换算成组分温度即可(公式(2))。

$$T_R = B_{\lambda}^{-1} \left[\frac{B_{\lambda}(T_B) - (1 - \epsilon_{\lambda})L_{\lambda}^{\downarrow}}{\epsilon_{\lambda}} \right] \quad (2)$$

式中,下标 λ 表示波长, ϵ_{λ} 为组分发射率, L_{λ}^{\downarrow} 为大气下行辐射, T_R 为组分温度(单位,K), T_B 为辐射计亮温(单位,K), B_{λ} 和 B_{λ}^{-1} 分别代表Planck黑体辐射函数及其逆函数。

以4月17日上午10点为例,天空等效亮温 -33.1°C ,土壤亮温为 24.0°C ,叶片亮温 19.4°C ,校正后土壤温度为 26.4°C ,叶片温度 20.8°C 。可以看出校正后温度与校正前的亮度温度差别较大(土温差 2.4°C ,叶温差 1.4°C),这说明亮温必须进行校正才能用于验证。

气象数据包括顺义气象台站常规观测数据和实验样地连续观测数据。采用日本产MR-21型辐射表测量向下太阳总辐射。连续温湿度梯度和风速梯度测量高度分别为 0.5m , 1.0m , 2.0m , 3.5m , 6.0m 。

4 敏感性分析方法

敏感性分析(SA)方法很多,可以分为两种:Local和Global。Local方法不考虑参数之间的相关性,Global方法允许同时改变所有参数,所以其输出结果将是所有参数及其交互的结果。其中Monte Carlo分析方法,响应面法(The Response Surface Methodology)和FAST(The Fourier Amplitude Method)是三种通用的Global SA技术^[9]。根据CUPID这种复杂的、非线性的模型特点,敏感性分析及不确定性分析将基于Monte Carlo分析方法。

敏感性分析的对象是所有输入参数和能代表组分温度分布的几个输出参数。考虑到运行效率和典型性问题,本文选取EOS卫星白天过境(上午10点半和下午2点半)的时刻进行敏感性分析和不确定性分析。输出参数共6个:两次卫星过境时的土壤平均温度 T_s ,植被冠层平均温度 T_v ,植被冠层温度廓线 T_p ,以AM和PM作为后缀分别代表上午和下午。不考虑喷灌系统参数、气孔阻力参数和一些常量,CUPID标准输入参数中共有45个参数进行分析。本文选择地面实验6天的实测数据(代表小麦的几个主要生长期),生成6个标准输入文件,以供后面分析。

本文敏感性分析的主要步骤是:(1)通过包含所有输入参数的敏感性分析确定出关键输入参数;(2)确定关键输入参数的个体不确定性;(3)对所有关键参数进行整体不确定性分析;(4)评价每个关

键参数的贡献率。

4.1 关键参数的确定

根据参与敏感性分析的 45 个参数的不同特点, 本文将它们分为类型敏感和数值敏感两种参数。所谓类型敏感是指通常只能选择有限的几个数值或者代码, 不具备数值上的连续性的参数的敏感性; 数值敏感是指数值上连续, 并且具有一定物理意义的参数的敏感性。由于参数对误差响应有差异, 数值敏感又分为绝对误差敏感和相对误差敏感。相对误差敏感性表示参数绝对误差随着参数大小而变化, 但是相对误差保持不变。绝对误差敏感性表示参数的绝对误差不会随着参数的大小而变化, 比如, 温度参数测量误差通常是绝对误差 (单位为 K), 最好选用绝对误差进行敏感性判别。

4.1.1 相对误差敏感参数确定

对于相对误差敏感的参数, 通常其测量要求误差不会大于 10%, 选择 $\pm 10\%$ 作为它们的最大相对误差, 能够测试其敏感性, 有利于挑选关键参数。参数的初始取值均为测量值, 对每个参数和初始状态, 本文选择三个值 ($+10\%$, -10% , 原值) 运行 3 次, 对应得到 3 组组分温度的模拟输出值 $nm(+10\%)$, $nm(-10\%)$, $nm(no\ bias)$ 。然后得到模拟组分温度的偏差绝对值 ($VR + 10\%$ 和 $VR - 10\%$), 公式如下:

$$VR + 10\% = |nm(no\ bias) - nm(+10\%)| \quad (3)$$

$$VR - 10\% = |nm(no\ bias) - nm(-10\%)| \quad (4)$$

$VR + 10\%$ 和 $VR - 10\%$ 之间的最大值记为 M , 作为输入参数影响因子。然后, 所有相对误差敏感参数按照对应的影响因子降序排列, 选择合适的阈值 (本文为 1K), 小于该阈值的视为不敏感参数^[10], 否则为敏感参数。然后, 对于敏感参数, 从 -10% 到 $+10\%$ 按照一定步长, 生成相对误差数组, 类似上述方法循环运行, 直到找到 M 等于 1K 为止, 所对应的相对误差作为该参数的最大容许相对误差 (MRE), 以供进一步分析。

4.1.2 绝对误差敏感参数确定

对于绝对误差敏感的参数, 按照一定间隔, 选择参数的不同绝对误差 B 序列, 逐次运行, 每次得到温度绝对误差 ($VR + Bi$ 和 $VR - Bi$), 公式与 (3) (4) 类似。如果 $VR + Bi$ 或者 $VR - Bi$ 的最大值等于 1K, 那么对应的 Bi 就是输入参数的最大容许绝对误差 (MAE)。如果 MAE 处在参数正常误差范围内 (比如测量误差或者系统误差之内, 可以通过文献或者

外业测量数据估计), 那么该参数就是敏感参数。

4.1.3 类型敏感参数确定

对于类型敏感的参数, 本文对该参数所有的类型进行运行后, 与参考类型运行的结果进行比较, 取最大绝对偏差 IM 作为输入参数影响因子。如果 IM 大于或者等于 1K, 则认为是敏感参数, 否则认为不敏感。

按照上述规则得到的所有敏感参数作为关键参数, 保留做进一步的不确定性分析。由于对类型参数而言, 只要确定了类型, 就可以防止误差产生, 所以本文的不确定性分析部分不考虑类型敏感关键参数。

4.2 关键参数的个体不确定性分析

在本研究中, 必须确定每个关键参数的分布函数。然而, 确定输入参数的范围和概率密度分布函数 (PDFs) 是进行不确定性分析的最困难的一步。原因很简单: 很多模型参数并不是直接测量得到的, 即使是测量得到的, 收集大量的数据来确定其“真实的”PDFs 也非常困难。因此, 只要是相关的知识, 包括顺义实验中收集的数据、模型文档、类似研究, 以及其他文献中的数据, 都可以用来估计。正确的输入参数范围比真实 PDFs 的获取对于 SA 分析更有效, 可以用简单分布 (如均匀分布或者三角形分布) 来进行 SA 分析^[11]。

因此, 在本文中为了简单起见, 所有关键参数都假设服从均匀分布, 通过均值和标准差确定参数取值范围。考虑地面采样误差、仪器误差、曲线拟合误差等获得了输入参数不确定性估计, 计算得到了取值范围。如果确实找不到误差估计, 给定相对误差 10%。

4.3 关键参数的整体不确定性分析

采用 Monte Carlo 方法模拟关键参数的整体不确定性。主要步骤如下: (1) 根据 4.2 节方法, 将每个关键参数的 [均值 - 标准差, 均值 + 标准差] 作为抽样范围; (2) 通过随机数产生器对所有关键参数在其抽样范围内按均匀分布抽样, 得到一组样本, 加上非敏感参数, 生成 CUPID 模型所需的输入文件; (3) 运行 CUPID 程序, 得到组分温度; (4) 保存关键的抽样数据和组分温度; (5) 重复 (1) 到 (4) 步骤 4000 次; (6) 计算 4000 次运行得到的每个输出组分温度的平均值和标准差, 百分比的变化系数 (标准差 / 平均值); 变化系数即为整体不确定性。

这里所有选择的关键参数每次同时抽样生成输

入文件,运行获得的是输出组分温度参数的整体(G bbal)不确定性。4000次是为了得到较宽范围的输入数据集,从而更好地得到模型输出的统计特征。保存的抽样关键参数和输出组分温度一一对应,用来做不确定性贡献率分析。另外,注意植被冠层温度廓线的平均值和标准差是分层的,这样可以度量每一层的不确定性。为了方便起见,下面植被温度廓线 T_p 的平均值和标准差,采用分层温度中标准差最大的那一层的数据参与分析。

4.4 关键参数不确定性贡献率分析

4000次运行对应的关键输入参数和输出的6个组分温度参数,标准化后共同构成了一个大矩阵,采用逐步回归统计方法,可以计算出每个输入参数

与组分温度之间的相关程度。在逐步回归的过程被剔除掉的参数对整体不确定性的贡献不大,视为不相关参数。在置信度为95%的条件下,如果回归方程通过F检验,则可以根据回归系数以及相关系数,判断单个参数的不确定性对整体不确定性的贡献率:回归系数绝对值越大,相关系数越接近于1,贡献率越高。

5 结果与讨论

5.1 关键参数

按照上述敏感性分析方法进行模拟,共发现关键参数19个,数值敏感参数13个(表1),类别敏感参数6个(表2)。

表1 关键参数误差类型和不确定性(%)

Table 1 Error type and uncertainty(%) of the key parameters

序号	关键参数	MRE	MAE	不确定性		参考依据
				%	标准差	
1	土壤容重	8%	-	3.5	-	实验测量
2	风速 (m/s)	-	0.4	-	0.4	实验测量
3	绿叶发射率	-	0.04	-	0.04	实验测量
4	土壤表层含水量 ($m^3 m^{-3}$)	-	0.01	15	-	实验测量
5	太阳辐射 ($W m^{-2}$)	-	40	-	40	[12]
6	气温 K	-	1.1	15	-	[13]
7	LA I ($m^2 m^{-2}$)	-	0.2	-	0.25	[14]
8	绿叶反射率 (NIR)	-	0.08	-	0.08	实验测量
9	绿叶反射率 (TIR)	-	0.04	-	0.04	实验测量
10	最大绿叶宽度	31%	-	10*	-	
11	最低绿叶相对高度	2%	-	10*	-	
12	冠层高度	6%	-	10*	-	
13	最大叶面积密度相对高度	20%	-	10*	-	

*表示没有可以估计的数据则取10%作为最大误差。

可以看出,关键参数的类型误差会对模拟组分温度带来很大影响。就土壤水分类型的分析结果可以看出,表面湿度变化比根系水分变化更能影响土壤温度和植被温度的模拟值。

5.2 关键参数的不确定性分析

由于只有在估计类型错误时,类型参数才会发生误差,所以其不确定性在这里不考虑。剩下13个关键参数的不确定性百分比(标准差)见表1。

参数的不确定性并不是可以严格比较的,因为它们是从不同角度进行估计的:仪器误差,取样误差(空间差异),曲线拟合误差等。另外,不同尺度和空间位置的影响也不同。

5.3 输出参数的不确定性及贡献率分析

5.3.1 模拟结果分析

包含13个关键参数的4000次模拟不确定性结果见表3。结果表明:模拟的均值与均值的模拟结

表 2 类别敏感参数主要生长期温度误差 (绝对值)

Table 2 The absolute errors of the class type parameters during growing season

类型参数		天 d					
		91	102	107	111	123	139
土壤组成 (砂粒 粉砂粒 粘粒)	砂壤土 (0.6:0.3:0.1)	0.2	1.6	1.6	2.0	1.7	1.3
	黑黄土 (0.6:0.2:0.2)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	壤土 (0.4:0.4:0.2)	0.4	3.5	2.3	2.5	2.9	2.5
穗	有 无	1.2	0.9	1.0	0.8	1.0	0.0
叶倾角	喜平型 (planophile)	0.5	3.2	1.4	2.1	2.8	3.1
	实测 (60±10°)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	椭球型 (spherical)	0.1	0.8	0.2	0.5	0.8	0.1
绿叶比	0.1	0.5	2.4	2.0	2.4	2.1	2.0
	0.8	0.3	0.6	0.8	0.7	1.1	0.0
土壤水分	表层干, 根系湿润	11.6	7.1	1.6	6.0	6.6	1.8
	表层根系均湿润	0.2	7.8	8.8	5.9	3.2	19.5
	表层湿润, 根系干	0.0	12.0	8.7	5.8	3.1	19.5
簇状因子	0.5	1.3	5.2	5.8	6.2	9.6	5.9
	0.9	0.2	1.0	0.9	1.0	1.3	1.0

表 3 4000 次模拟结果与参考模拟结果相比较 (不确定性系数 VC 表示为模拟的标准差 / 模拟均值)

Table 3 Results of simulations reference simulation compared to the 4000 ensemble simulations (The percentage uncertainty is given for (S.D. / mean))

输出组分 温度 /℃	参考模拟 结果	不确定性分析结果		不确定性 (%)
		平均值 (mean)	标准差 (STD)	
TvAM	25.5	25.4	0.6	2.4
TsAM	27.9	27.6	1.3	4.7
TvPM	30.0	29.8	0.6	2.0
TsPM	33.3	32.1	2.6	8.1
TpAM	26.3	26.2	0.6	2.3
TpPM	30.5	30.6	0.7	2.3

果基本一致, 差别小于 1K。模拟的土壤温度标准差大于 1K, 且下午超过 2K; 而模拟的植被组分温度和冠层廓线温度的标准差基本稳定在 0.6K 上, 与时间无关, 并且以均值为中心, 成正态分布。不过, 得到的模型不确定性结果, 只是与输入输出参数和初始条件误差相关的整体不确定性, 并不代表模型的

不确定性。

5.3.2 日不确定性变化

为了检验不确定性分析的结果是否在全天具有普遍意义, 以 2001 年 4 月 17 日的真实数据作为输入, 以估计的输入参数不确定性为依据, 进行从上午 9 点到下午 5 点的每隔半小时的 Monte Carlo 模拟, 统计其输出的土壤温度的均值及其标准差, 如图 2 所示。可以看出, 植被组分温度一天之内的不确定性变化几乎不变, 而土壤组分温度的不确定性变化近似于气温日变化规律, 呈正弦形状。这可能是

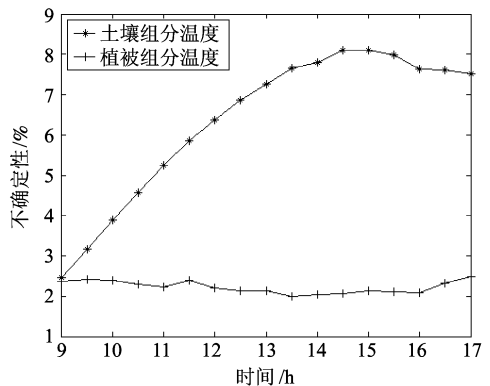


图 2 组分温度模拟不确定性的日变化

Fig 2 Diurnal variation of simulated component temperatures

CUPID的温湿度廓线求解机制决定的。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,以空气温湿度作为上边界,土壤根系部分的土壤温湿度作为下边界,CUPID就可以同时求解冠层内部空气和土壤的温湿度廓线。而廓线求解是一个非线性的迭代过程,气温作为边界条件是非常敏感的参数,在后面的贡献率分析中可以得到印证。当太阳辐射增强,土壤温度迅速增高时,气温和土壤温度的梯度就会增大,中午的气温 1K 的误差带来的土壤温度误差会大于早晨 1K 气温误差的影响。而植被由于具有自我调节功能,通过气孔的开合或者叶片朝向来维持自身温度和水分的平衡,所以不确定性很小,也很稳定。

5.3.3 生长期不确定性变化

为了分析不确定性分析结果的生长期变化规律,仍然以 6天的实测数据作为输入,以下午 14点半的冠层平均温度和土壤温度的不确定性为例,进行 Monte Carlo模拟,统计其输出温度的不确定性(标准差/均值),其规律如图 3所示。

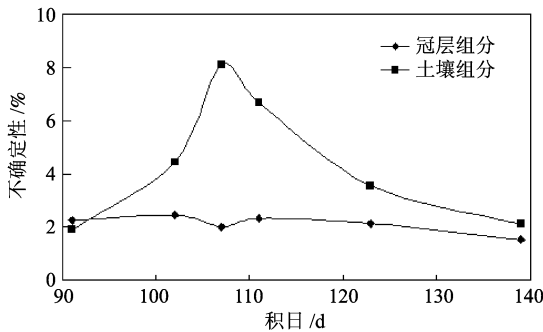


图 3 组分温度模拟不确定性的生长期变化

Fig 3 Variety of the uncertainty of simulated component temperatures during growing season

可以看出,随着生长期变化,冠层平均温度不确定性变化很小;而土壤平均温度则变化很大,首先是不确定性增大,在 4月 17日达到最大后,便逐渐降低。可能的原因是在 4月 17日之前,小麦覆盖度低(LAI较小,高度较低),土壤温度受外界环境影响较大;而 4月 17日以后,随着植被生长,土壤被遮挡,受环境影响逐渐降低。

5.3.4 关键参数不确定性贡献率分析

使用 MatLab 6.5 软件提供的逐步回归功能(stepwise函数),按照前述方法分析关键参数不确定性对总体不确定性的贡献率。自变量就是 13个关键输入参数。由于植被冠层廓线温度和植被平均温度相关性很强($R^2 > 0.97$),而土壤温度和植被平

均温度相关性较小(约 0.3),所以因变量只选择了植被平均温度和土壤平均温度两种,分别对 6天的 4000次模拟数据进行逐步回归分析。按照回归系数的绝对值进行降序排列,就可以得到贡献高低。回归结果的 R^2 均大于 0.9 均通过 F 检验。结果显示,气温和土壤表层含水量是最主要的贡献变量,回归系数绝对值多数可以达到 0.4 以上,最高可以达到 0.8 左右。对土壤组分温度模拟来说,LAI和太阳总辐射误差影响也很大,回归系数绝对值也在 0.2 左右。对植被组分温度模拟来说,太阳总辐射、叶子的发射率、近红外反射率和风速等参数误差贡献率差不多(回归系数绝对值 0.1 左右)。

5.4 实验验证

5.4.1 土壤表面温度

表 4 显示了 2001 年 4 月 1 日小麦地土壤温度在卫星过境时刻的测量数据和 CUPID 模型模拟的数据比较。图 4 显示了 2001 年 4 月 17 日白天土壤温度模拟数据与测量数据的比较。

表 4 模拟土温与测量土温比较(2001 年 4 月 1 日,顺义)

Table 4 Comparison between simulated and measured temperatures(2001-04-01 Shunyi)

测量时间	测量土温 / $^{\circ}\text{C}$	测量标准差 / $^{\circ}\text{C}$	同步卫星	模拟土温 / $^{\circ}\text{C}$
10:20-10:40	23.73	3.17	TM 7 10:30	22.37
11:12-11:30	25.96	4.26	MODIS 11:21	24.22
11:05-12:08	26.87	3.56	ETM 11:58	24.52

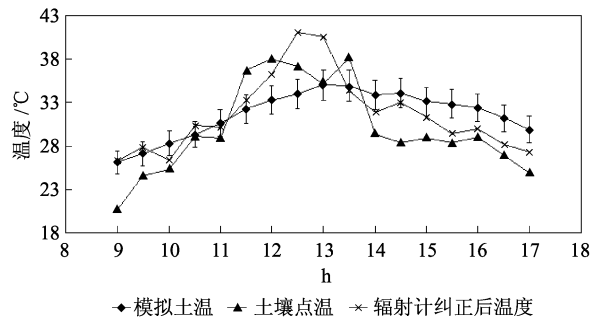


图 4 模拟土壤组分温度验证

(NW 4 2001 04 17 误差线表示绝对误差 $\leq 2\text{K}$)

Fig 4 Validation of the simulated soil component temperatures

从表 4 和图 4 中可以看出,卫星同步时刻模拟的土温与测量的土温吻合较好,其偏差可以用测量标准差和模拟的不确定性很好地解释。和实测相比,模拟土壤温度在正午前后偏低,上午吻合很好,

下午则偏高, 偏差均值为 -0.05K, 偏差绝对值均值为 2.2K, 趋势基本一致。由于中午土壤光照比例很大, 测量土温主要是光照土壤的温度, 而 CUPID 只能模拟土壤平均温度, 因此测量值偏高。

5.4.2 植被平均温度

图 5 显示了 2001 年 4 月 17 日白天植被平均温度模拟数据与测量数据的比较。可以看出, 上午点温数据和模拟的数据吻合很好, 平均偏差 1.7K, 而下午模拟数据和辐射计纠正后的温度吻合较好, 平均偏差 1.5K。其中土温和植被温度偏差较大的值都出现在下午。部分可能是因为气温测量误差: 对照不同样地 (NW 4 NW 5 和 NW 3) 的气温测量数据, 发现在下午测量气温的差别最大可以达到 3K 以上。

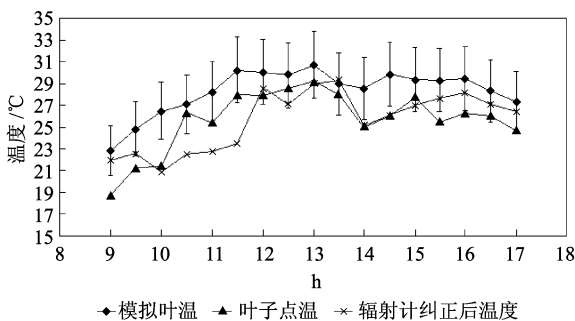


图 5 模拟冠层组分平均温度的验证 (NW 4 2001-04-17 误差线表示绝对误差 ≤ 2K)

Fig. 5 Validation of the simulated canopy temperatures

5.4.3 植被温度廓线

在顺义实验中, 只有 5 月 19 日的植被温度分层温度测量较为完整。图 6 显示了模拟冠层温度廓线

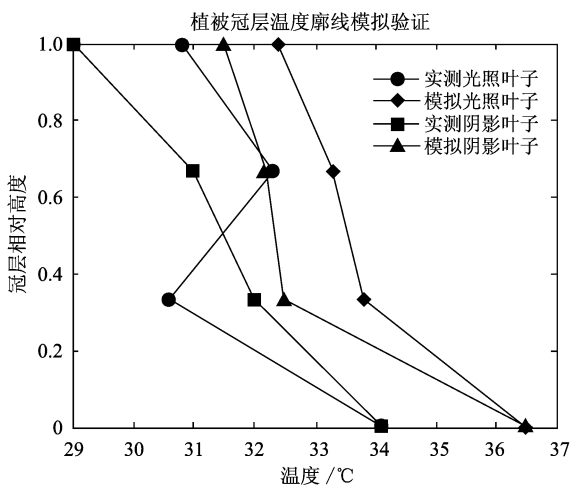


图 6 实测冠层温度廓线, 三层叶片和一层土壤 [1Q 30] Fig 6 Measured canopy temperature profile including 3 leaf layers and 1 soil layer [1Q 30]

与实测数据的比较。

从形状上讲, 模拟植被的温度廓线与测量的组分温度廓线相似, 但是温度总体偏高, 高估的现象与文献 [15] 相似, 可能原因是从常规气象数据模拟的小时太阳辐射和气温数据与实际相比偏高。另外还有可能是模型本身是一维的, 假设前提是水平均匀冠层, 其空间变异性考虑并不完整。而实测的组分温度数据最大偏差可以达到 4K 以上, 说明 CUPID 模型描述的过程可能不完全正确, 其模拟的尺度和验证的尺度不一致。

6 结 论

为了分析小气候参数对冠层组分温度的影响, 并分析其不确定性, 本文对一个典型的 SVAT 模型 CUPID 进行了组分温度模拟的敏感性和不确定性分析。共有 19 个关键参数对组分温度模拟敏感, 其中 13 参数为数值型参数, 进一步参与不确定性估计。不确定性分析结果表明, 植被组分温度模拟不确定性基本稳定在 2% ($\pm 0.6K$) 左右, 日变化和季节变化很小; 而土壤组分温度不确定性随每天时间变化和生长期变化而变化: 日不确定性类似气温日变化, 呈正弦形状; 生长早期随着植被生长呈增长趋势, 在 4 月 17 日达到峰值 8.1% ($\pm 2.6K$) 后逐渐降低。这说明只采用均值模拟, 而不注意参数的不确定性, 会导致模拟组分温度的较大差异。通过对 13 个参数的误差贡献分析, 发现气温和土壤表层含水量是最主要的贡献变量, 回归系数绝对值多数可以达到 0.4 以上, 最高可以达到 0.8 左右; 对土壤组分温度模拟, LAI 和太阳总辐射误差影响也很大, 回归系数绝对值也在 0.2 左右; 对植被组分温度模拟, 太阳总辐射、叶子的发射率和近红外反射率及风速等参数误差贡献率差不多 (回归系数绝对值 0.1 左右)。

通过以上分析, 可以得出两个结论:

(1) CUPID 组分温度模拟的不确定性较为有规律, 并且误差可控。关键是控制好气温和土壤湿度的测量精度。

(2) 可以采用 CUPID 模型模拟植被冠层组分温度分布。组分温度模拟趋势与实测基本一致。植被冠层温度廓线模拟温度高估的现象与文献 [15] 相似, 原因可能是一维模型水平薄层的假设与实际情况不符合, 也有可能是模拟尺度和验证尺度差异导致的。

致谢 荷兰 Wageningen 大学 Jia Li 博士对 CUPID 模型进行过指导, 并对论文提出了宝贵意见, 谨此致谢。

参 考 文 献 (References)

- [1] Chen L F, Zhuang J L, Xu X R. 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.
- [2] Norman JM. Modeling the Complete Crop Canopy [A]. Barfield B, J Geber J. Modification of the Aerial Environment of Crops [C]. American Society of Agricultural Engineers, St Joseph, Michigan, 1979.
- [3] Norman JM. Synthesis of Canopy Processes [A]. Russell G, Marshall B, Jarvis P. Plant Canopies: Their Growth, Form and Function [C]. Cambridge University Press, Cambridge, NY, 1988.
- [4] Inčána M, G. Forkela B R. Comparison of Energy Fluxes Calculated with the Penman-Monteith Equation and the Vegetation Models SIB and Cupid [J]. *Journal of Hydrology*, 1995, 166(3-4): 193-211.
- [5] Li J, 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]. Proceedings of IGARSS [C]. 2002, F-VI, 39-41.
- [6] Weiss A, Lukens D L, Norman JM, et al. Leaf Wetness in Dry Beans under Semi-arid Conditions [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1989, 48(1-2): 149-162.
- [7] Liu Q H, Li X W, Chen L F. Field Campaign for Quantitative Remote Sensing in Beijing [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(Supp): 43-49. [柳钦火, 李小文, 陈良富. 星机地同步定量遥感综合实验 (北京 2001) [J]. 遥感学报, 2002, 6(增刊): 43-49.]
- [8] Xiao Q, Liu Q H, Li X W, et al. A Field Measurement Method of Spectral Emissivity and Research on the Feature of Soil Thermal Infrared Emissivity [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2003, 22(5): 373-378. [肖青, 柳钦火, 李小文等. 热红外发射率光谱的野外测量方法与土壤热红外发射率特性研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(5): 373-378.]
- [9] Saltelli A. What is Sensitivity Analysis? In Saltelli, Chan A, K, Scott E M. Sensitivity Analysis [M]. Wiley, New York, 2000.
- [10] Dufrene E, Davi H, Francois G, et al. Modelling Carbon and Water Cycles in a Beech Forest. Part I: Model Description and Uncertainty Analysis on Modelled NEE [J]. *Ecological Modelling*, 2005, 185(2-4): 407-436.
- [11] Muketa M K, Nicklow JW. Sensitivity and Uncertainty Analysis Coupled with Automatic Calibration for a Distributed Watershed Model [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 306: 127-145.
- [12] Norman JM. Simulation of Microclimates [A]. Hatfield J L, Thomason I J. Biometeorology in Integrated Pest Management [C]. Academic Press, New York, 1982.
- [13] Guilioni L, Cellier P, Ruget F, et al. A Model to Estimate the Temperature of a Maize Apex from Meteorological Data [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 100(2-3): 213-230.
- [14] Mabne S, Herbert D A, Jr, Holshouser D L. Evaluation of the LAI2000 Plant Canopy Analyser to Estimate Leaf Area in Manually Defoliated Soybean [J]. *Agronomy Journal*, 2002, 94(5): 1012-1019.
- [15] Wilson T B, Norman JM, 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.