

基于 SHAW 模型对农田小气候要素的模拟

肖 薇¹, 郑有飞¹, 于 强^{2*}

(1. 南京信息工程大学环境科学系, 南京 210044; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 能量平衡是作物冠层水热传输的基础, 气象因子(如空气温度、湿度、风速和土壤温度)是影响作物活动的外界条件, 而叶温反映作物的整体健康状况。对冠层状况的理解和模拟有利于了解小气候特征并加强农田管理。采用 SHAW(the Simultaneous Heat and Water)模型模拟: 冠层表面能量平衡, 表面辐射温度, 冠层中叶温、气象要素和土壤温度廓线, 模型的输入数据来源于华北平原禹城综合试验站。模型很好的模拟了表面能量平衡、冠层表面辐射温度、土壤温度、冠层 2/3 高度以下叶温和 2/3 高度以上气象要素。模型模拟净辐射(R_n)的效率达到 0.97, 潜热(LE)和感热通量(H_s)的模拟效率分别为 0.81 和 0.78, 模拟的表面辐射温度与实测值吻合较好, 其模拟效率为 0.91, 冠层 2/3 高度以下的叶温模拟效率为 0.76~0.86, 但该高度以上的模拟结果不理想。除了 2cm 深度外, 各层土壤温度模拟较好。

关键词: SHAW; 小气候; 能量平衡; 表面辐射温度; 叶温; 土壤温度; 玉米

文章编号: 1000-0933(2005)07-1626-09 中图分类号: Q145 文献标识码: A

Evaluation of SHAW model in simulating energy balance, leaf temperature and micrometeorological variables within a maize canopy

XIAO Wei¹, ZHENG You-Fei¹, YU Qiang^{2*} (1. Department of Environmental Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1626~1634.

Abstract: Yucheng is a typical city in the North China plain, which is one of the most important growing districts of grain. Research on it will benefit to the agriculture of the whole region. Furthermore, energy balance is the basis for simulating heat and water transfer in crop canopy. Temperature reflects the condition of plant objectively. Meteorological factors such as air temperature, humidity and wind speed as well as soil temperature are the ambient conditions that affect the activity of plants. Canopy temperature reflects the overall plant health. Understanding and simulating canopy conditions can assist in better acknowledgement of microclimate characteristics and management solutions.

The Simultaneous Heat and Water (SHAW) model was used in this study to simulate the surface energy balance, profiles of leaf temperature and micrometeorological variables of a maize canopy and underlying soil temperatures using data collected in Yucheng.

The results indicated that the model well simulated air temperature, relative humidity and wind speed in the upper layers rather than the lower, with model efficiency falling from about 0.95 to very small. Since poor simulation occurred especially for wind speed, modification was made to the model, and the simulation was improved accordingly.

Energy balance of canopy surface was simulated throughout the growing season of maize using the modified model as above. The simulated net radiation mimicked with the measured, with model efficiency equaling 0.97. The simulations of latent and sensible heat flux were reasonable with model efficiency 0.81 and 0.78 respectively. But the bias of ground heat flux

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40328001)

收稿日期: 2004-12-08; 修订日期: 2005-04-18

作者简介: 肖薇(1982~), 女, 黑龙江绥化人, 硕士, 主要从事农业气象学研究。E-mail: xiaowei-522@163.com

致谢: 中国科学院禹城综合试验站刘振民协助观测, 谨致谢意。

* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: yuq@igsnrr.ac.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 40328001)

Received date: 2004-12-08; Accepted date: 2005-04-18

Biography: XIAO Wei, Master, mainly engaged in agricultural meteorology. E-mail: xiaowei-522@163.com

was obvious, which may due to the lack of measured energy balance closure. In addition, the simulation discovered that the precipitation influenced measurement significantly.

The coefficient of simulated and measured radiometric temperature reached above 0.9, when the temperature was higher than 30℃, the simulated temperature was 0.34℃ bigger than the measured. The leaf temperature above the 2/3 of plant height was simulated better than the lower layers with model efficiency equaling 0.85. The soil temperatures near surface were simulated well with model efficiency above 0.80. The simulated temperature was higher than measured value near surface but lower in the deep depth.

In conclusion, the SHAW model simulated variables above of maize canopy in typical region of the North China Plain reasonably, and some weakness of the model were discovered, which will be the reference of improvement of the SHAW model and the development of others.

Key words: SHAW; micrometeorological; energy balance; radiometric temperature; leaf temperature; soil temperature; maize

对土壤-大气边界附近条件的了解,包括发芽、作物生长、昆虫种群动态、水分保持、土壤冻结、渗透、径流和地表水入渗等,现在已经成为许多领域关注的焦点。分析土壤-植被-大气系统(SPAC)的水、热传输有利于了解小气候特征并制定有效的农田管理措施。能量平衡描述了冠层中长波短波净辐射分配成感热、潜热通量的比例以及热容量的变化,它是水热传输的基础和农田碳、氮循环的驱动因子。随着更好的表征冠层-大气相互作用的要求的日益提升,模拟冠层和大气中物质和能量的传输已经成为越来越被关注的领域。外界条件直接影响作物的生命活动(如光合作用、呼吸作用、蒸腾作用和极端温度对作物的损害),而冠层温度通过影响光合、蒸腾、气孔导度、水汽传输阻力和整个作物胁迫来影响作物的生理过程。对农田中上述因素的了解和分析,有助于我们更加深入地了解农田中的小气候特征,并制定积极有效的管理措施。有关大气-作物表层能量和物质传输方面的研究已经近 40a^[1],并建立了一些模型^[2]。我国的农业计算机模型研究是在 20 世纪 80 年代初期开始,已经开发了 CCSODS 等一系列模型^[3]。SHAW 模型由 Flerchinger 和 Saxton^[4]建立,1991 年由 Flerchinger 和 Pierson 修改加入了作物蒸腾和作物冠层^[4]。模型在模拟从植被、雪、凋落物到土壤的热量、水分和化学物质传输以预测气候和农田管理对土壤冻结、雪融化、土壤温度、土壤水分、蒸发、蒸腾、能量通量和表面温度的影响已经得到论证^[2,5~14];同时,模拟不同气候条件下凋落物种类和结构对水热传输的影响也得到验证^[15]。然而,该模型在模拟冠层中气象因素廓线的能力并没有被检验。本文的目的是检验 SHAW 模型模拟以下 5 个方面的能力:(a)能量平衡;(b)冠层表面辐射温度;(c)叶温廓线;(d)小气候因素廓线(空气温度、相对湿度和风速)和(e)土壤剖面温度廓线。利用禹城综合试验站玉米冠层资料驱动模型,所得以上 5 方面的结果与实测值进行对比分析。

1 试验方法

1.1 试验地点

试验观测在华北平原中国科学院禹城综合试验站(北纬 36°50',东经 116°34',海拔高度 28m)进行,禹城站属暖温带半湿润季风气候,多年平均温度 13.1℃,多年平均降水量 528 mm。选择面积为 300m×300m 的灌溉良好的玉米田为观测场地,其周围为相同生长期的有充足水分供应的玉米田,向四周伸展超过 5km。除了东南风向的风会受到坐落在试验田以南的试验楼的影响外,试验田的范围覆盖了有效空气动力风浪区。

1.2 测量仪器

1999 年冠层内分层小气候要素(气温、风速和相对湿度)由作物冠层微气象仪^[16]测量;2003 年小气候要素(气温、风速和相对湿度)分别由自动校准热通量传感器(HFP01SC, Hukseflux, Netherlands)、风速计(A100R, Vector, U.K.)和湿度探针(HMP45C, Vaisala, Helsinki Finland)测量,上述仪器被安置在高于冠层顶处。

土壤温度和水分含量由土壤热通量传感器(TCAV, Campbell Scientific, Logan, UT)和水分含量反射仪(CS616-L, Campbell Scientific, Logan, UT)在特定深度测得。

净辐射和太阳总辐射由四元净辐射计(CNR-1, Kipp&zonen, Delft, The Netherlands)测得;冠层水热量通量分别由安置在冠层顶的三维声波测风仪(Model CSAT3, Campbell Scientific Inc. Logan UT)和开路式红外气体分析仪(IRGA, Model LI-7500, LI-COR, Inc., Lincoln, NE)测量;土壤热通量由安装在地表面以下 5mm 的热通量传感器(HFP01, Hukseflux, Netherlands)测得。

玉米冠层的表面辐射温度用安装在冠层顶部的以 45°俯视角的红外热电偶传感器(IRTS-P-L50IRT, Pogue, USA)测量。不同层次冠层的叶温由手持式热红外温度传感器(IRT, Minolta/Land Cyclops Compac 3)测得,该传感器的数据读取频率为 4Hz,视角为 8°,探测 8~14μm 频段的辐射;测量前应用工业 Everest 黑体表面校正;每个高度的叶温通过水平转动仪器测得。

1.3 观测方法和数据处理

1999 年 8 月 3 日至 5 日(儒略日 215~217)观测了冠层中的气温、相对湿度和风速。每 1h 观测 1 次,作物高度大约 220cm,气象要素在离地面 40、90、140cm 和 230cm 高度处测量,总辐射在 230cm 测量,降雨量由距离试验地 100m 左右的气象观测场得到,土壤温度和湿度测量深度从上到下依次为地表、5、10、15、20、40、60cm 和 100cm。

2003 年资料,每 1h 观测 1 次,气温、风速、相对湿度、总辐射、能量平衡(包括净辐射、感热通量和潜热通量)和表面辐射温度均在距地面 280cm 高度处测得。土壤温度和湿度在地表、2、5、10、20cm 和 50cm 深度处测得,降水的测量方法同 1999 年。北京时间 8:00~18:00 每 1h 观测 1 次叶温,测量高度分别为距地表 60、80、100、120、140、160、180cm 和 200 cm。作物最大高度大约 260cm。

1.4 模型描述和模拟试验

SHAW 模型由 Flerchinger 和 Saxton^[4]开发,为了加入作物冠层,1991 年由 Flerchinger 和 Pierson^[4]对其改进,最终该模型包含从植物冠层、雪被、凋落物到土壤的一维、垂直廓线。该廓线被分为多层,每一层的信息由独立的节点表示。

采用上边界以上的天气形式(包括气温、风速、湿度、太阳辐射和降水)和下边界以下的土壤状况来定义系统中的水热通量,步长为日或小时。该系统分层,每层由一个独立的节点表征。每个时步均计算各节点间的能量、湿度和溶质通量,每个节点的能量公式隐函有限差分公式表示。

模型的理论核心是表面边界上的能量平衡,由气象观测数据(包括气温、风速、相对湿度和太阳辐射)计算得到。表面能量平衡可写为:

$$R_n + H + L_v E + G = 0 \quad (1)$$

式中, R_n 为全波净辐射(W/m^2), H 为感热通量, $L_v E$ 为潜热通量(W/m^2), G 为土壤或地表热通量(W/m^2), L_v 为蒸发潜热(J/kg), E 为土壤表面和作物冠层的总蒸发量($kg/(m^2 \cdot s)$)。

通过计算冠层中各层的热量和水汽传输,并考虑叶片的热源项和蒸腾作用来确定热量和水汽通量。冠层中的传输应用梯度驱动传输(或称为 K-理论),通过迭代计算冠层中热量、水汽传输方程和蒸腾作用来计算叶温能量平衡。Flerchinger 等^[2,4~8]曾对能量和物质传输过程进行了详细阐述。

1999 年 8 月 3 日至 5 日(儒略日 215~217)模拟了冠层中的气温、相对湿度和风速。步长为 1h。

利用 2003 年资料,模型分别模拟了如下因素:(1)6 月 15 日~10 月 9 日(儒略日 166~282)冠层表面能量平衡;(2)7 月 6 日~10 月 9 日(儒略日 187~282)冠层表面辐射温度;(3)8 月 17 日~9 月 18 日(儒略日 229~259)冠层不同层次叶温和(4)6 月 15 日至 10 月 9 日(儒略日 166~282)土壤温度。模拟步长为 1h。

2 结果分析

用模型效率(Model Efficiency, ME)^[17]、标准差(Root Mean Square Error, RMSE)和平均偏差(Mean Bias Error, MBE)来描述模型模拟的效果,可表示如下:

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (3)$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i) \quad (4)$$

式中, $\hat{Y}_i$ 为模拟值; Y_i 为观测值; $\bar{Y}$ 为观测平均值; N 为观测样本数。

2.1 对 1999 年观测时段的模拟和检验

模型模拟了自 1999 年 8 月 3 日至 5 日(儒略日 215~217)玉米冠层中距离地表 40、90、140cm 和 230cm 的小气候要素。比较气温、相对湿度和风速的观测值与模拟值,发现冠层上部各要素的模拟值与实测值吻合情况好于下部。冠层顶部的模拟情况最好,模型效率为 0.96。在冠层底部,气温的模型效率降至 0.55,相对湿度的模型效率降低到 0.52。气温和相对湿度的观测和模拟值的差异幅度下层高于上层(如表 1a 中的 RMSE 值所示)。MBE 的值表明各层气温均被过高估计;相对湿度在 230cm 处被高估,在其他高度被过低估计。而风速的模拟结果不理想,风速模拟的偏差表明模型中关于风速随深度指数递减的规律假设不合理。

为此,分别用 2、3、3.5 和 4 去除风速方程中的指数,而其模拟的 ME、RMSE 和 MBE 值分别在表 1b、c、d 和 e 中给出。对比原模型和修改后模型的模拟结果,发现冠层顶的气象要素模拟结果变化不大,而冠层下部气温的 ME 增大。当除数取为 3 的时

候, 相对湿度的 ME 值最大。当除数为 3.5 时, 除了 40cm 高度, 其他高度风速模拟令人满意。因此, 采用除数为 3.5 修改的模型模拟结果如图 1, 从中可以发现明显的改善。

表 1 1999 年 8 月 3 日至 5 日(儒略日 215~217)不同冠层小气候变量(风速、气温和相对湿度)模拟结果的统计分析

Table 2 Average measured values, ME , $RMSE$, and MBE for the simulated micrometeorological variables from 3 to 5 August (day 215 to 217) of 1999

高度 Height (cm)		风速 Wind speed			气温 Air temperature			相对湿度 Relative humidity		
		模型效率	标准差	平均偏差	模型效率	标准差	平均偏差	模型效率	标准差	平均偏差
		ME	RMSE(m/s)	MBE(m/s)	ME	RMSE(℃)	MBE(℃)	ME	RMSE(%)	MBE(%)
a	40	-0.13	0.12	-0.07	0.55	3.54	2.15	0.52	12.05	-10.20
	90	-0.60	0.57	-0.41	0.74	2.81	1.41	0.83	7.76	-5.36
	140	-1.28	1.15	-0.97	0.91	1.77	0.56	0.93	5.32	-2.09
	230	0.96	0.19	-0.16	0.95	1.20	0.08	0.97	3.75	1.34
b	40	-0.31	0.12	0.12	0.58	3.43	2.06	0.54	11.83	-9.83
	90	0.52	0.31	-0.13	0.75	2.76	1.33	0.84	7.55	-4.97
	140	0.02	0.75	-0.62	0.91	1.76	0.53	0.93	5.28	-1.95
	230	0.96	0.19	-0.16	0.95	1.20	0.07	0.97	3.76	1.37
c	40	-8.68	0.34	0.31	0.59	3.36	2.03	0.52	12.08	-9.96
	90	0.71	0.24	0.08	0.76	2.71	1.31	0.84	7.61	-5.00
	140	0.50	0.54	-0.43	0.91	1.74	0.52	0.94	5.21	-1.97
	230	0.96	0.19	-0.16	0.95	1.20	0.07	0.97	3.74	1.35
d	40	-14.60	0.43	0.39	0.60	3.32	2.01	0.49	12.47	-10.12
	90	0.63	0.27	0.16	0.76	2.69	1.28	0.83	7.76	-5.05
	140	0.62	0.47	-0.36	0.91	1.74	0.50	0.94	5.12	-1.91
	230	0.96	0.19	-0.16	0.95	1.21	0.06	0.97	3.82	1.39
e	40	-20.95	0.51	0.46	0.61	3.30	2.02	0.49	12.47	-10.12
	90	0.50	0.32	0.22	0.76	2.67	1.29	0.83	7.76	-5.05
	140	0.71	0.41	-0.31	0.91	1.73	0.51	0.94	5.11	-1.97
	230	0.96	0.19	-0.16	0.95	1.20	0.07	0.97	3.78	1.37

a 原始 SHAW 模型模拟结果 simulation of original SHAW model; b、c、d 和 e 是分别用 2、3、3.5 和 4 除模型中风速方程中指数后的模拟结果 b, c, d and e are simulations of modified SHAW model by dividing the exponential in wind speed function with 2, 3, 3.5, 4 respectively

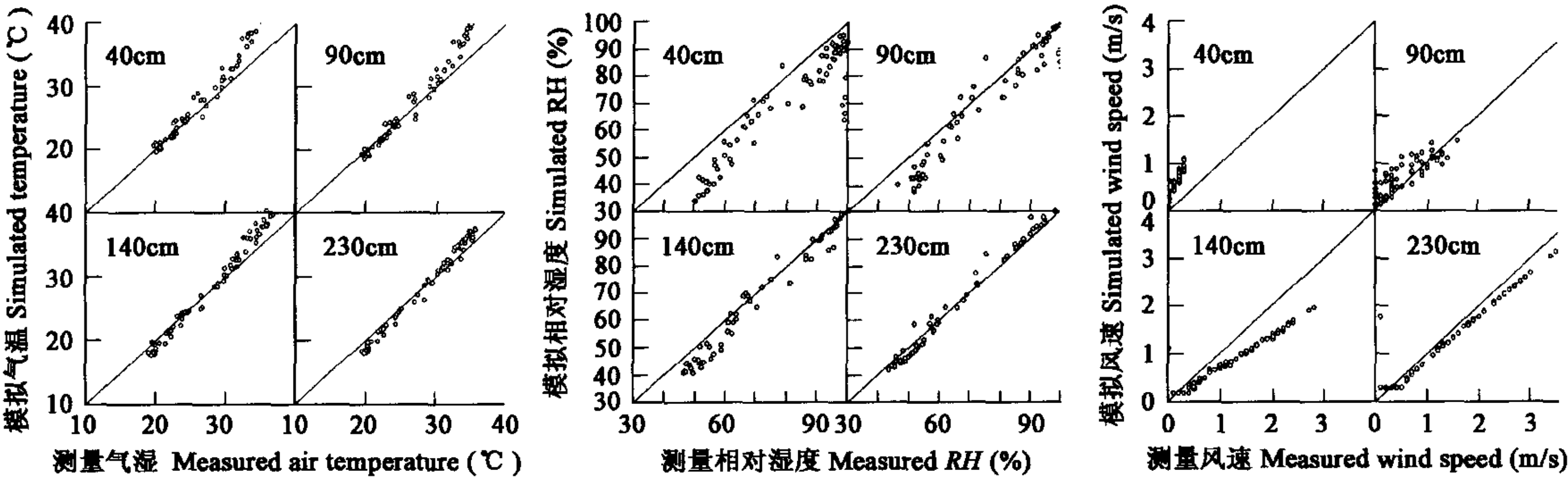


图 1 改进的 SHAW 模型模拟冠层各层气象要素结果

Fig. 1 Micrometeorological simulation of modified SHAW model of each canopy layer
a: 气温 Air temperature, b: 相对湿度 Relative humidity, c: 风速 Wind speed

2.2 对 2003 年观测时段的模拟和检验

2.2.1 能量平衡各分量的模拟 采用 2003 年 6 月 15 日(玉米播种期)至 10 月 9 日(玉米成熟期)(儒略日 166~282)的气象数据运行如上所述以 3.5 为除数的修正模型。整个生育期的净辐射、潜热、感热和土壤热通量的模拟值和实测值的比较如图 2 所示。能量平衡的 ME 、 $RMSE$ 和 MBE 值见表 2。

净辐射的模拟值和实测值吻合较好, 其 ME 为 0.97, MBE 为 $-0.4W/m^2$ 。潜热通量被过高估计(即负值更高), ME 等于 0.81, MBE 为 $-9.1W/m^2$; 感热通量被过低估计(即负值更小), ME 为 0.78, MBE 为 $6.5W/m^2$; 土壤热通量的模拟情况较差, ME 仅为 0.17。潜热通量的模拟值和实测值的差异幅度最大($RMSE$ 为 $42.0W/m^2$), 感热通量最小($RMSE$ 为 $24.7W/m^2$)。模

拟值和实测值之间的偏差可能由观测的能量平衡不闭合^[18]引起,特别是土壤热通量测量较差(这一点可以由后面的分析看出)。图3为6月15日至10月9日(儒略日166~282)净辐射和土壤热通量之差与感热和潜热通量之和的比较,即表明了能量平衡观测的不闭合性。

从8月15日至9月18日(儒略日227~261)的能量平衡模拟值和实测值的日变化(图4)可以发现,从儒略日235~239、241~242、244、247~249、251、260~262的能量平衡各组分均明显低于其它日,且实测值与模拟值吻合情况明显差于其他日,由于以上时段有降水,所以有必要检测降雨是否会影响能量平衡的观测和模拟。为此,8月15日至9月18日全部天数和仅晴天的模拟的 ME 、 $RMSE$ 和 MBE 在表3中给出。只考虑晴天,净辐射的模拟结果变化不大;潜热通量的 ME 由0.59升至0.69,潜热通量由0.52升至0.69,土壤热通量由0.40升至0.54。在此阶段的模拟中,无论是否考虑阴雨天,净辐射模拟值过高,潜热通量模拟偏高(负值更大),感热通量模拟偏低(负值更小)。而所有天数都考虑时,土壤热通量模拟值偏低;只考虑晴天,模拟值偏高。模拟值和实测值差异的幅度,潜热通量最大,土壤热通量最小(如表3所示)。

表2 2003年6月15日至10月9日(儒略日166~282)能量平衡各组分的统计分析

Table 2 Average measured values, ME , $RMSE$, and MBE for components of the surface energy balance from 15 June to 9 October (Day 166 to 282) of 2003

	平均值 Average (W/m^2)	模型效率 ME	标准差 RMSE (W/m^2)	平均偏差 MBE (W/m^2)
净辐射 R_n	86.4	0.97	30.0	-0.4
潜热通量 LE	-64.8	0.81	42.0	-9.1
感热通量 H_s	-23.9	0.78	24.7	6.5
地表热通量 G	1.3	0.17	31.9	0.0

所有通量单位为 W/m^2 ,并定义朝向表面方向为正 All fluxes are in W/m^2 and assumed positive toward the surface

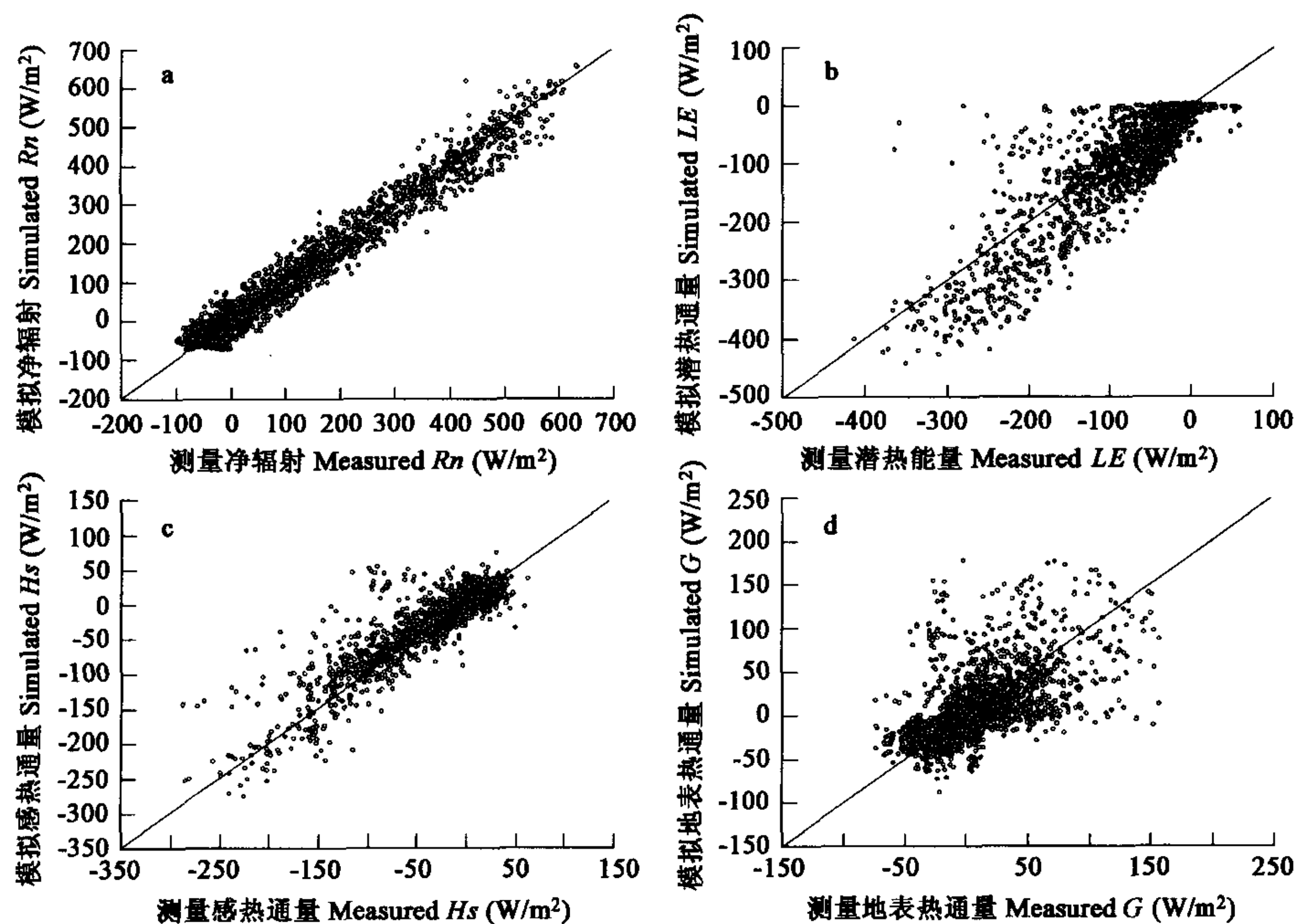


图2 2003年6月15日至10月9日(儒略日166至282)净辐射、潜热、感热和土壤热通量的模拟值与实测值对比

Fig. 2 Comparison between simulated and measured net radiation, latent heat flux, sensible heat flux and ground heat flux from 15 June to 9 October (Day 166 to 282) of 2003

a:净辐射,b:潜热通量,c:感热通量,d:土壤热通量

另外,由表3可以看出,土壤热通量在所有天数的平均值为正,而晴天测量的平均值为负,这表明阴雨天对其观测的影响很大。而自227日至261日所有天数的模拟,其 ME 达到0.40,明显高于166日至282日的 ME 值(仅为0.17),这表明土壤热通量在此时期模拟较好。

2.2.2 冠层温度 图5显示了2003年7月6日至10月9日(儒略日187~282)玉米冠层表面辐射温度的模拟值和实测值的比较。从图6中可以看出观测值和模拟值吻合较好,相关系数达到0.9以上,在叶面温度低于 $30^{\circ}C$ 时,其值分布于1:1线附近,高于 $30^{\circ}C$ 时,模拟值比实测值偏高约 $0.34^{\circ}C$,其 ME 达到0.91(如表4)。

表 3 2003 年 8 月 15 日至 9 月 18 日(儒略日 227 至 261)所有天数及晴天能量平衡各组分统计分析

Table 3 Analysis for simulated components of the surface energy balance in all days and in clear days respectively from 15 August to 18 September of 2003 (day 227 to 261)

	所有天 All days				晴天 Clear days			
	平均值 Average (W/m ²)	模型效率 ME	标准差 RMSE (W/m ²)	平均偏差 MBE (W/m ²)	平均值 Average (W/m ²)	模型效率 ME	标准差 RMSE (W/m ²)	平均偏差 MBE (W/m ²)
净辐射 R_n	75.6	0.96	32.2	2.0	108.7	0.96	38.6	2.5
潜热通量 LE	-66.8	0.59	55.5	-12.6	-75.5	0.69	54.3	-31.4
感热通量 H_s	-18.4	0.52	30.2	15.4	-67.1	0.69	27.0	19.3
地表热通量 G	1.0	0.40	20.4	-2.5	-1.0	0.54	17.9	3.1

在 8 月 17 日至 9 月 16 日(儒略日 229~259)的晴天中,模拟了不同冠层高度的叶温。叶温用手持式红外叶温仪观测,为表征其观测数据的可靠性,图 6 给出了 9 月 12 日(儒略日 255)特定时间和高度的仪器读取数据的时间序列,表 5 给出了各次读取数据的平均值和标准差,其标准差最小为 0.15,最大为 0.46,表明观测可信。

对比分析表明冠层 2/3 高度(大约 180cm)以下模拟好于其上,早晚的模拟好于正午。在冠层 2/3 高度以下,ME 值自 60cm 的 0.76 变为 160cm 的 0.86 和 180cm 的 0.85,模拟值偏低 1℃ 左右,200cm 的模拟较差,其 ME 约 0.38。冠层上部的模拟值偏高可能由模型的以下局限引起:(1)一些研究表明 K 理论在冠层空间不可用^[19],而 Wilson 等^[20]发现 K 理论总是过高估计冠层辐射温度;(2)为简单起见,冠层中各层次的长波散射由认为等于气温的叶温计算得到。所以,每个层次中各种作物之间的长波辐射交换被忽略,而气温和叶温间的差异引起散射的长波辐射

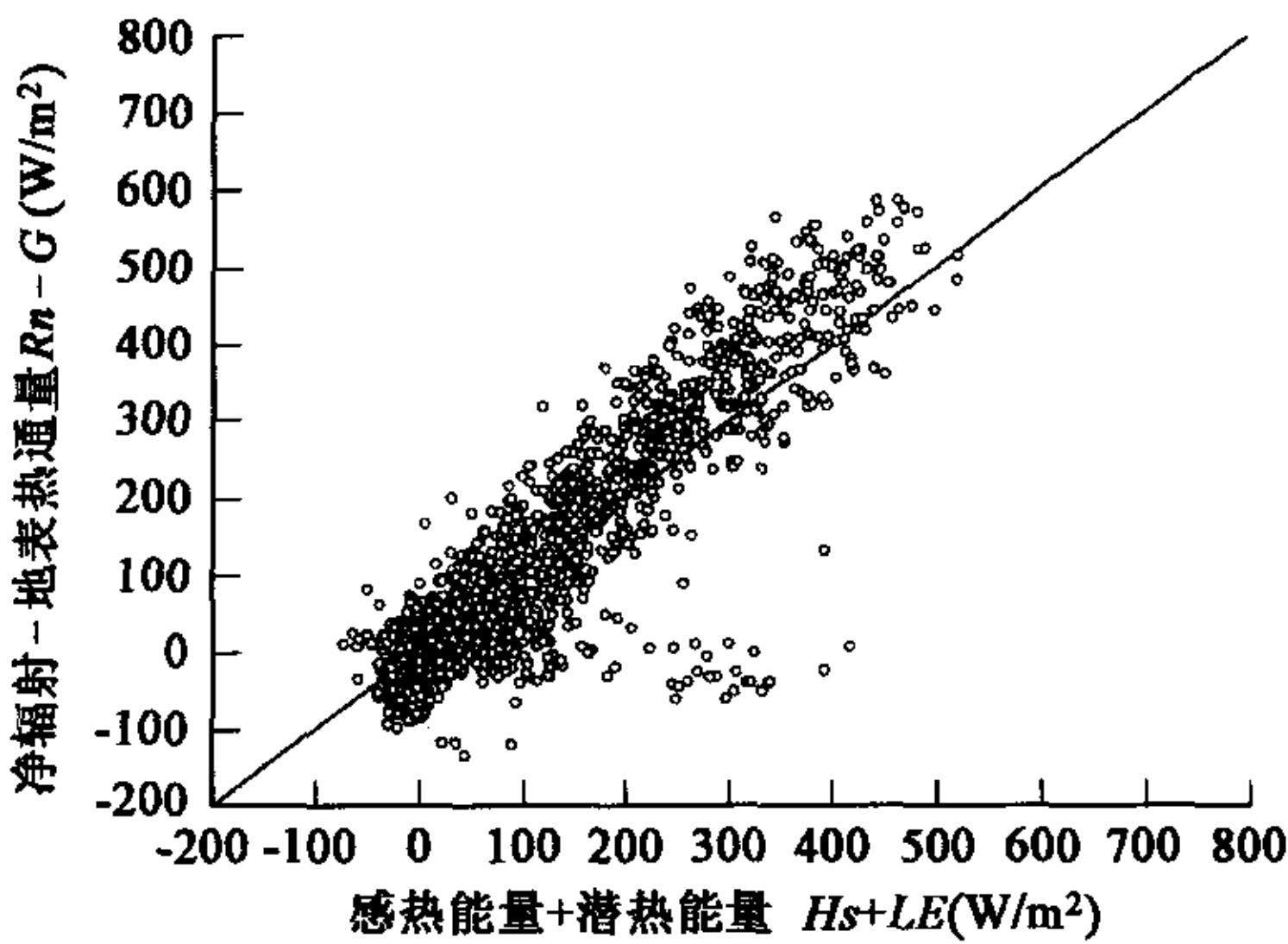


图 3 观测的净辐射和土壤热通量之差与潜热感热通量之和的比较(2003 年 6 月 15 日至 10 月 9 日,儒略日 166 至 282)

Fig. 3 The comparison between net radiation + ground heat flux and the sum of negative latent and negative sensible heat fluxes from 15 June to 9 October (Day 166 to 282) of 2003

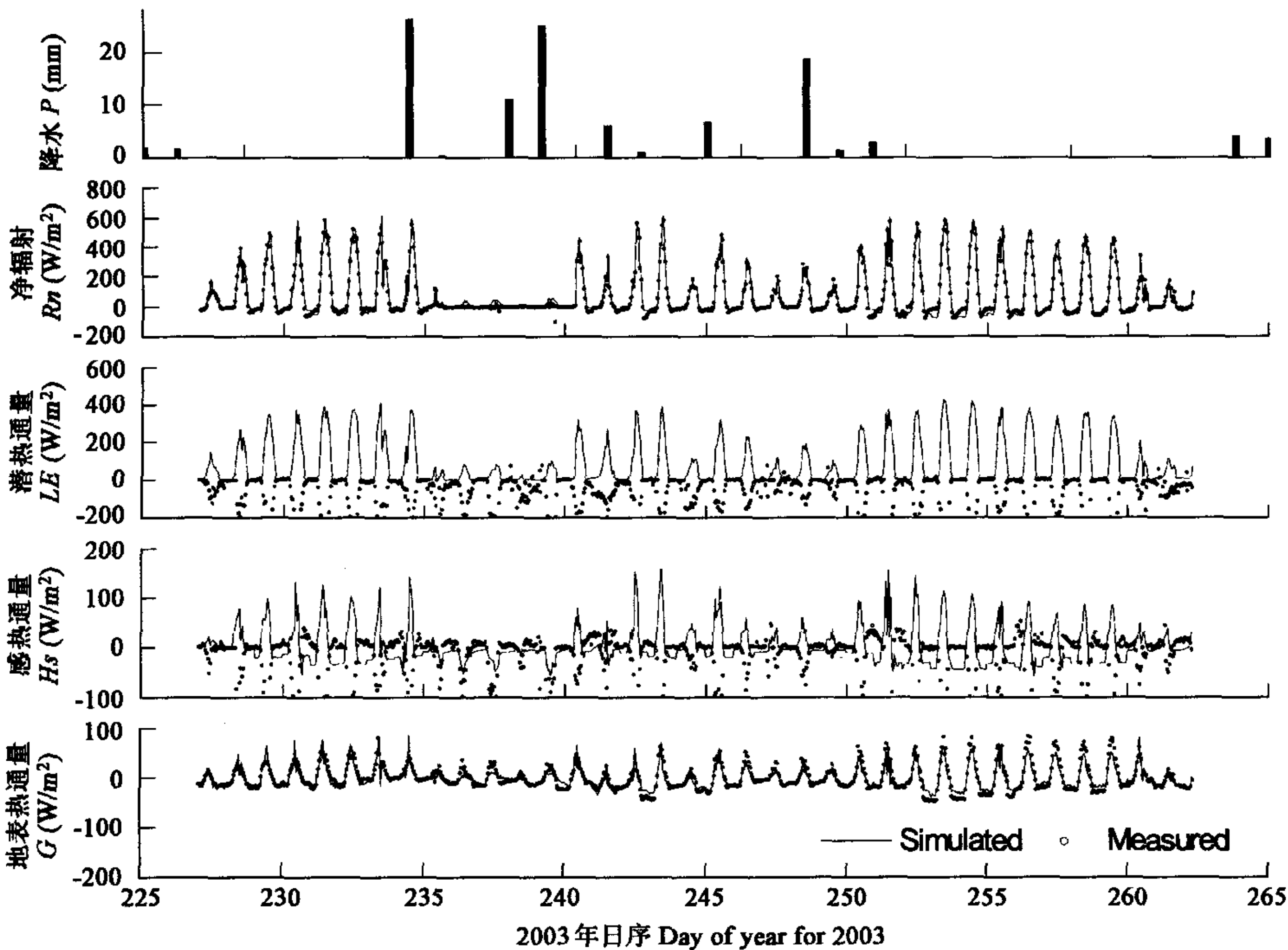


图 4 玉米冠层能量平衡各组分的模拟值和实测值比较(2003 年 8 月 15 日至 9 月 18 日,儒略日 227 至 261)

Fig. 4 Comparison between measured and simulated components of the surface energy balance of maize canopy in Yucheng from 15 August to 18 September of 2003 (day 227 to 261)

的偏差;(3)各层的叶温由叶片能量平衡计算得到,其假设叶片没有热容量;(4)此模型模拟一维廓线,而没有考虑水平湍流交换(该局限在接近冠层顶时更明显)。

2.2.3 土壤温度 土壤温度的模拟和实测值对比结果(图 7)表明模型在土壤表面和较深层次模拟较好,其 *ME* 在 0.80 和 0.91 间变化(如表 6),但是在较浅层次模拟效果较差,2cm 的 *ME* 仅为 0.48,5cm 为 0.65。土壤表面温度模拟值偏低,其 *MBE* 为 $-0.18\text{ }^{\circ}\text{C}$,而其他层次模拟值偏高。*RMSE* 随由 50cm 至表面持续升高表明模拟的偏差在较浅层次较高。

表 4 冠层表面辐射温度的统计分析

Table 4 Analysis for radiometric temperature of canopy surface			
平均值 Average($^{\circ}\text{C}$)	模型效率 ME	标准差 RMSE($^{\circ}\text{C}$)	平均偏差 MBE($^{\circ}\text{C}$)
23.02	0.91	1.73	0.34

表 5 叶温观测序列的平均值和标准差

Table 5 The mean value and standard deviation of time series of the leaf temperature observation								
高度 Height (cm)	8:00		12:00		16:00		20:00	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
	Average($^{\circ}\text{C}$)	RMSE	Average ($^{\circ}\text{C}$)	RMSE	Average ($^{\circ}\text{C}$)	RMSE	Average ($^{\circ}\text{C}$)	RMSE
60	20.15	0.22	27.05	0.15	26.88	0.19	17.74	0.27
100	20.04	0.17	27.3	0.16	26.7	0.23	17.38	0.23
140	20.23	0.25	27.46	0.46	25.91	0.41	16.68	0.45
180	20.23	0.28	25.99	0.32	25.56	0.36	16.57	0.42

表 6 土壤温度的模拟测度

Table 6 Measure of simulated soil temperature				
土壤深度 Soil depth(cm)	平均值 Average($^{\circ}\text{C}$)	模型效率 ME	标准差 RMSE($^{\circ}\text{C}$)	平均偏差 MBE ($^{\circ}\text{C}$)
0	24.44	0.82	2.67	-0.18
2	23.61	0.48	2.28	0.53
5	23.55	0.65	1.79	0.48
10	23.43	0.80	1.26	0.42
20	23.15	0.91	0.73	0.31
50	22.04	0.85	0.64	0.35

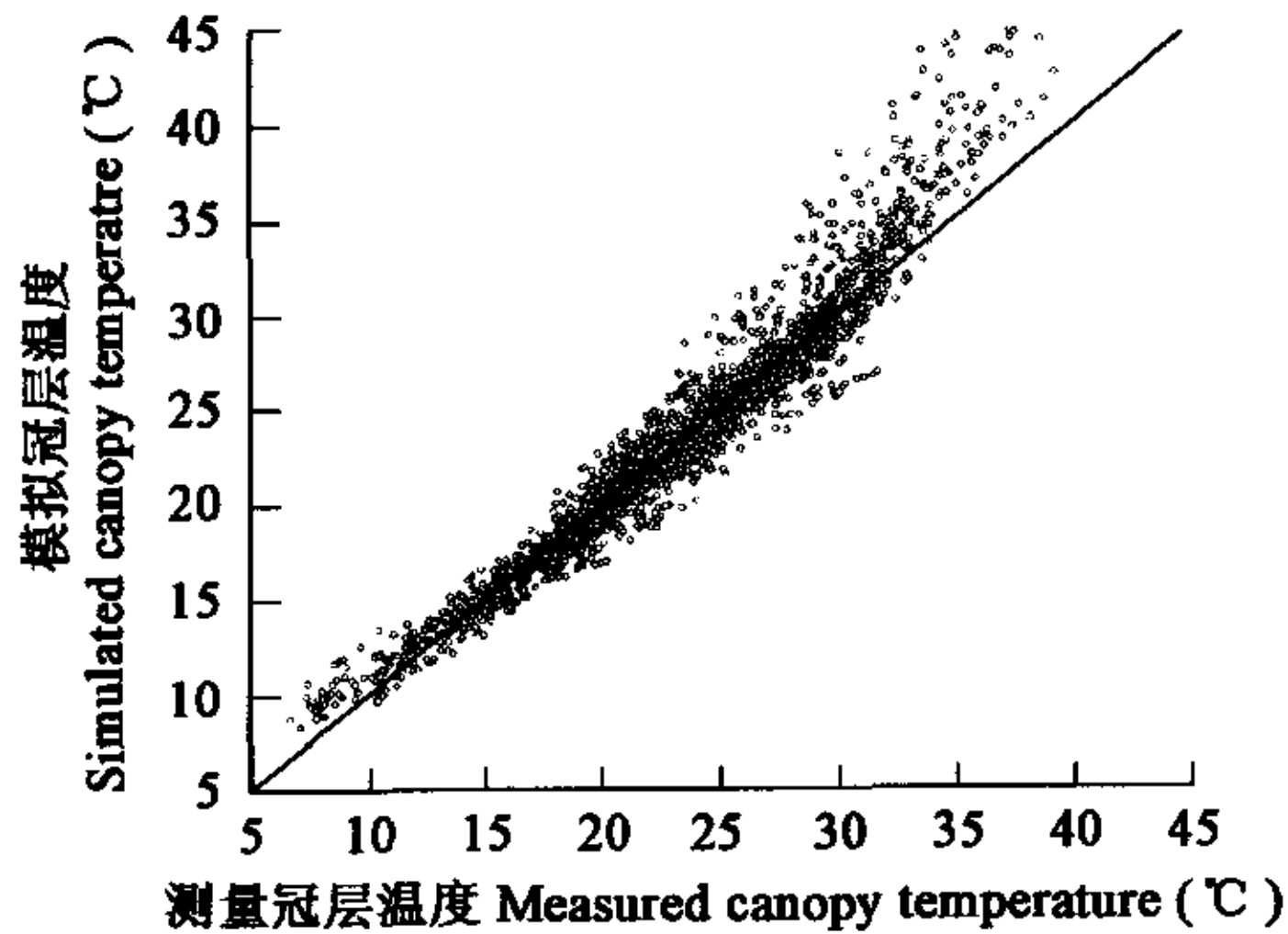


图 5 冠层表面辐射温度的实测值和模拟值对比

Fig. 5 Simulated versus measured radiometric surface temperature

自 9 月 9 日至 14 日(儒略日 252~257),冠层顶部气温、冠层表面辐射温度和土壤温度的模拟和实测值(图 8)给出了自冠层顶至下部土壤的整体温度描述,表明 SHAW 模型模拟的温度廓线较合理。

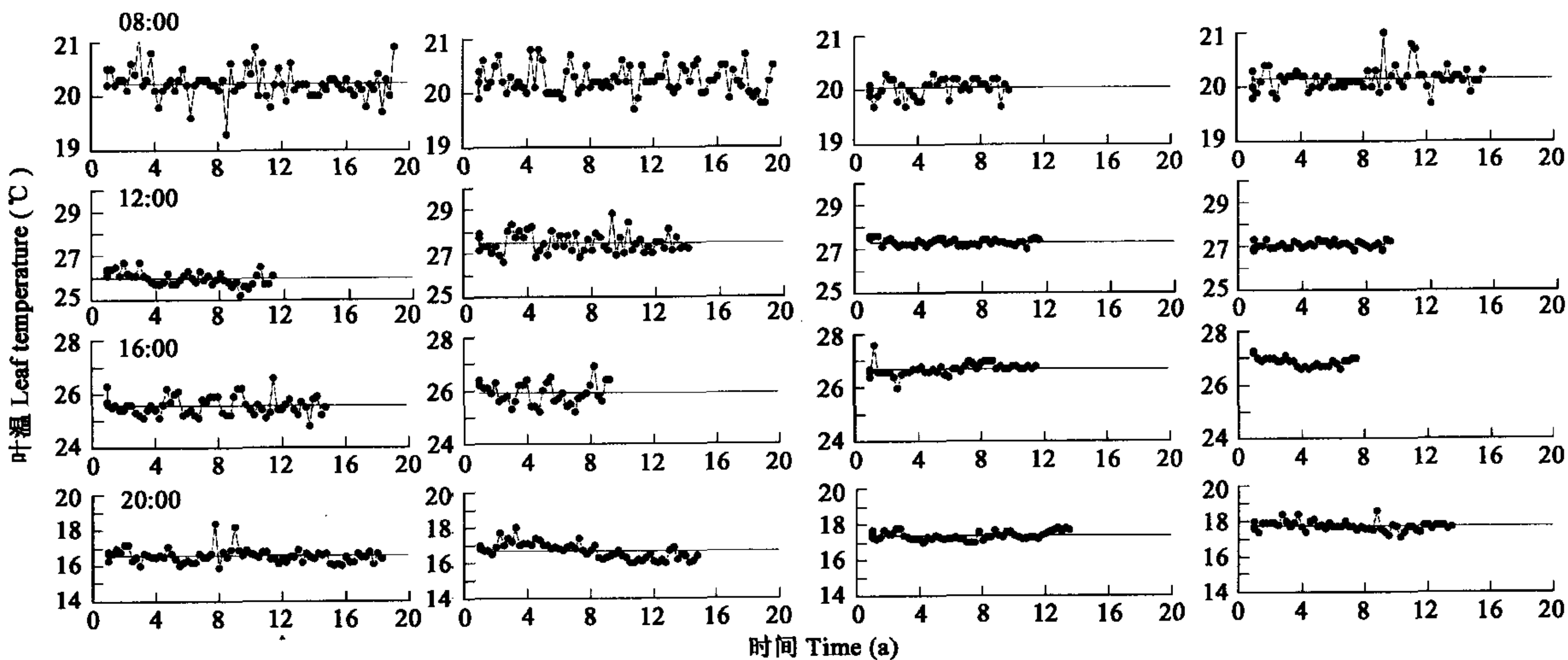


图 6 2003 年 9 月 12 日(日序 255)叶温观测时间序列(图中直线为该序列数据的平均值)

Fig. 6 Time series of measured leaf temperatures on September 12 (day 255) of 2003(The straight-lines in the figures represent the average of the time series data)

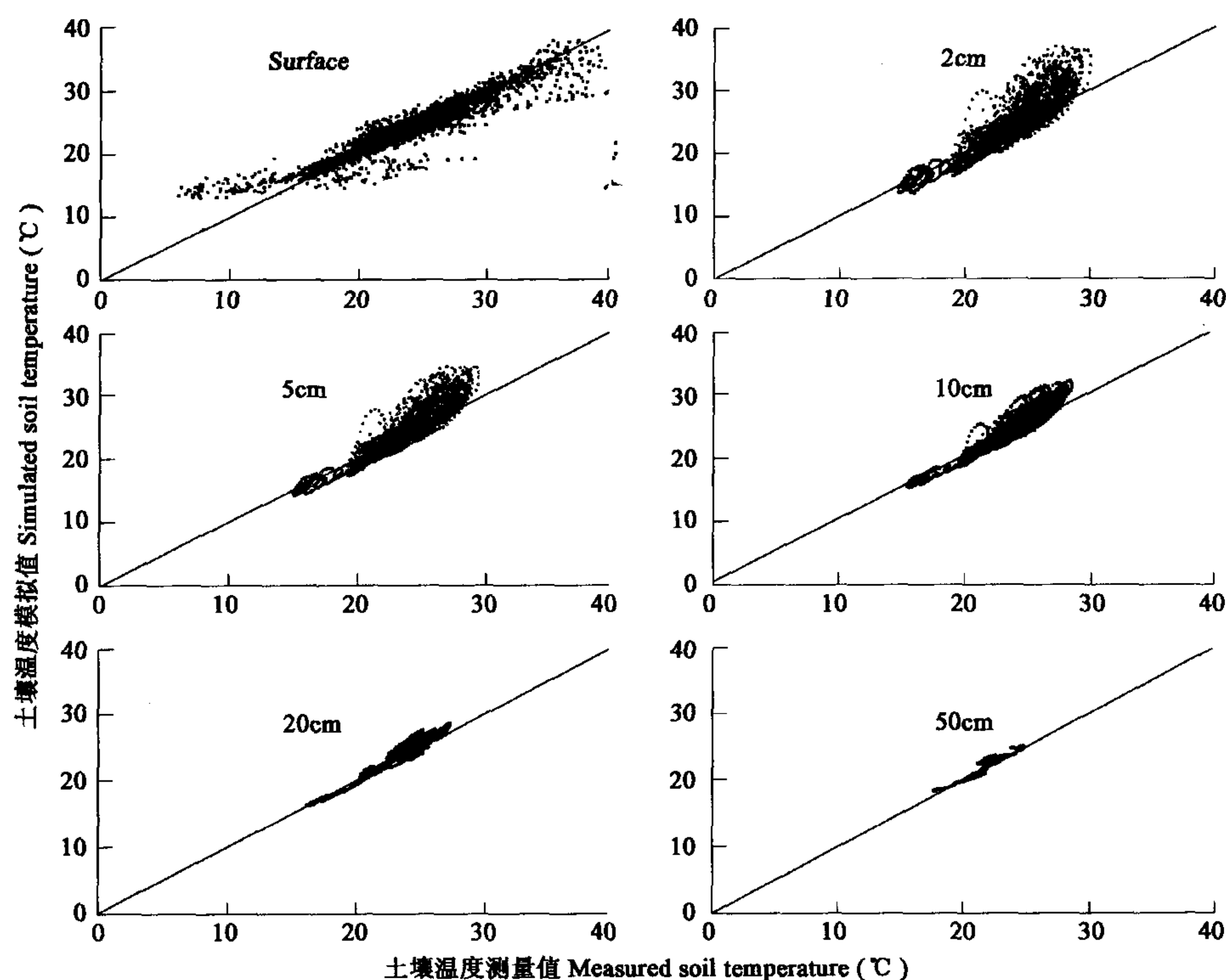


图 7 2003 年 6 月 15 日至 10 月 9 日(儒略日 166 至 282)各层土壤温度模拟值和实测值对比

Fig. 7 Comparison of simulated and measured soil temperature (°C) at different depth from 15 June to 9 October (Day 166 to 282) of 2003

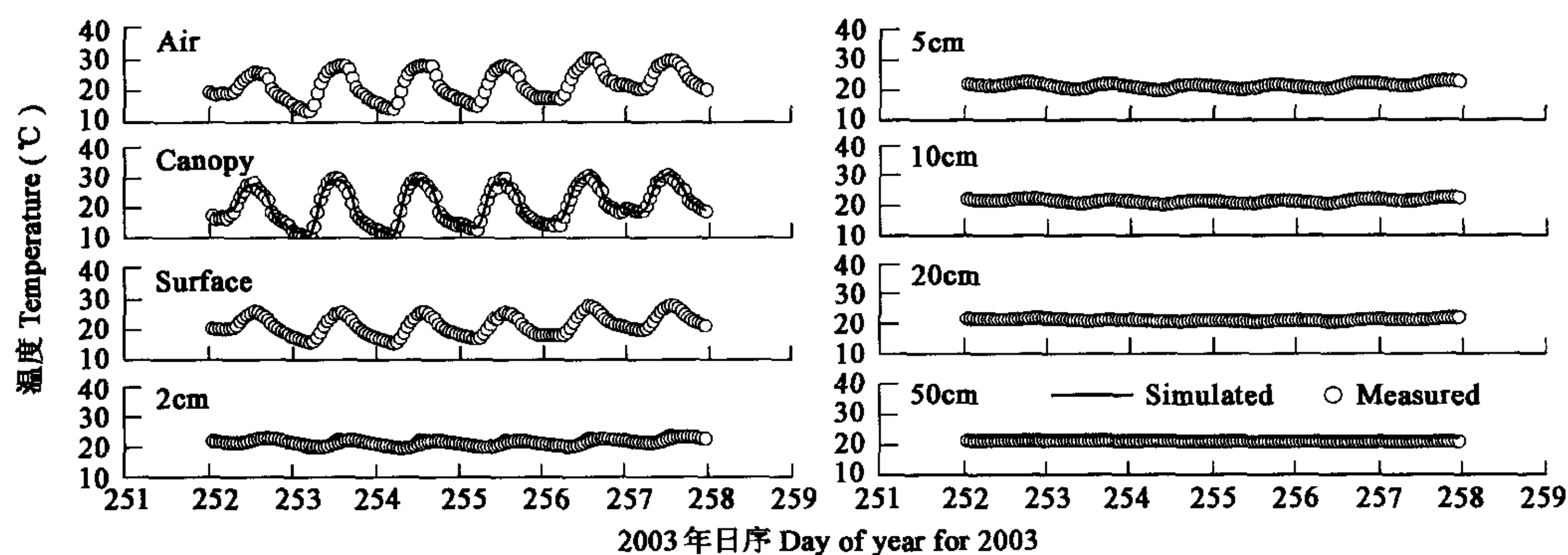


图 8 2003 年 9 月 9 日至 14 日(儒略日 252 至 257)自冠层顶至下层土壤的温度廓线

Fig. 8 Profiles of temperatures from canopy top to underlying soil from 9 to 14 September (Day 252 to 257) of 2003

3 结论

农田小气候要素变化与冠层中各层次辐射传输和热量平衡紧密相联。尤其叶温反映了冠层能量平衡的特征,模拟中发现突然水分状况控制了净获得能量(R_n-G)在潜热和感热中的分配,进而影响了冠层红外叶温和小气候要素的分布。

本文应用 SHAW 模型模拟了禹城玉米冠层中小气候要素的廓线、能量平衡、冠层表面辐射温度以及叶温和土壤温度的廓线。气象要素在冠层上部模拟较好,接近土壤表面时不理想。净辐射在 2003 年的整个模拟时期模拟较好,ME 达到 0.97、MBE 为 -0.4 W/m^2 。潜热和感热通量模拟较好,ME 为 0.80 左右,前者被过高估计(负值更大),其 MBE 约为 -9.1 W/m^2 ;后者被过低估计(负值更小),其 MBE 约为 6.5 W/m^2 。土壤热通量的模拟情况不理想。在雨天的模拟不理想。

冠层表面辐射温度模拟较好,其 ME 达到 0.91。各层叶温不能同时模拟好,在 2/3 高度左右模拟最好,其下效果较好,模拟值偏高 0.57 到 1.38°C ;其上则被过高估计,模拟效果不理想。土壤温度在土壤表面和较深层次模拟较好。

由以上模拟结果可见,SHAW 模型能合理的模拟冠层上部气象要素的廓线、冠层的能量平衡和表面辐射温度、冠层中下部

的叶温和土壤温度。

References:

- [1] Waggoner P E, Reifsnnyder W E. Simulation of the temperature, humidity and evaporation profiles in a leaf canopy. *J. Appl. Meteor.*, 1968, **7**, 400~409.
- [2] Flerchinger G N, Kustas W P, Weltz M A. Simulating surface energy fluxes and radiometric surface temperatures for two arid vegetation communities using the SHAW model. *J. Appl. Meteorol.*, 1998, **37**(5), 449~460.
- [3] Gao L Z. *Foundation of agricultural modeling science*. Hongkong: Tianma book finite association, 2004. 15~22.
- [4] Flerchinger G N, Saxton K E. Simultaneous heat and water model of a freezing snow-residue-soil system I. Theory and development. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 1989, **32**(2), 573~578.
- [5] Flerchinger G N, Pierson F B. Modeling plant canopy effects on variability of soil temperature and water. *Agric. For. Meteorol.*, 1991, **56**: 227~246.
- [6] Flerchinger G N, Cooley K R, Deng Y. Impacts of spatially and temporally varying snowmelt on subsurface flow in a mountainous watershed 1. snowmelt simulation. *Hydrol. Sci. J.*, 1994, **39**:507~520.
- [7] Flerchinger G N, Baker J M, Spaans E J A. A test of the radiative energy balance of the SHAW model for snowcover. *Hydrol. Proc.*, 1996, **10**(10): 1359~1367.
- [8] Flerchinger G N, Hanson C l, Wight J R. Modeling of evapotranspiration and surface energy budgets across a watershed. *Water Resour. Res.*, 1996, **32**(8): 2539~2548.
- [9] Flerchinger G N, Hanson C L. Modeling soil freezing and thawing on a rangeland water shed. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 1989, **32**(5): 1551~1554.
- [10] Xu X, Nieber J L, Baker J M, *et al.* Field testing of a model for water flow and heat transport in variably saturated, variably frozen soil. *Transportation Research Record*, vol. 1307. Transp. Res. Board, Nat. Res. Council, Washington, DC, 1991. 300~308.
- [11] Hayhoe H N. Field testing of simulated soil freezing and thawing by the SHAW model. *Can. Agric. Eng.*, 1994, **36**(4): 279~285.
- [12] Kennedy I, Sharratt B. Model comparisons to simulate frost depth. *Soil Sci.*, 1998, **163**(8): 636~645.
- [13] Hymer D C, Moran M S, Keefer T O. Soil water evaluation using a hydrologic model and calibrated sensor network. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, **64**(1): 319~326.
- [14] Nassar I N, Horton R, Flerchinger G N. Simultaneous Heat and Mass Transfer in Soil Columns Exposed to Freezing/Thawing Conditions. *Soil Science*, 2000, **165**:(3):208~216.
- [15] Flerchinger G N, Sauer T J, Aiken R A. Effects of crop residue cover and architecture on heat and water transfer at the soil surface. *Geoderma*, 2003, **116**:217~133.
- [16] Sun X M, Yu Q, Luo Y, *et al.* The design and application of an observation instrument of microclimate within crop canopy. *Eco-agriculture Research*, 2000, **8**(1): 76~79.
- [17] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models I. A discussion of principles. *J. Hydrol.*, 1970, **10**(3): 282~290.
- [18] Wilson K, Allen Goldstein, *et al.* Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agric. Forest Meteor.*, 2002, **113**: 223~243
- [19] Denmead O T and Bradley E F. Flux-gradient relationships in a forest canopy. In: B. A. Hutchison and B. B. Hicks, *The Forest-Atmosphere Interaction*. D. Reidel Publishing Co., Hingham, Massachdusettes, 1985. 412~442.
- [20] 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. *Agric. Forest Meteor.*, 2003, **115**: 51~69.

参考文献:

- [3] 高亮之主编. 农业模型学基础. 香港:天马图书有限公司, 2004. 15~22.
- [16] 孙晓敏, 于强, 罗毅, 等. 作物冠层微气象仪器研制与应用. 生态农业研究, 2000, **8**(1):76~79.