

基于 SHAW 模型的冬小麦近地面层气温模拟*

刘峻明¹ 汪 念¹ 王鹏新¹ 胡 新² 黄健熙¹

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 商丘市农林科学院小麦研究所, 商丘 476000)

摘要: 利用一维多层水热耦合 SHAW (The simultaneous heat and water) 模型, 在田间实验的基础上, 模拟河南省商丘地区 2015 年冬小麦拔节后近地面层 0 ~ 40 cm 垂直方向上的每小时气温变化特征。结果表明, 冬小麦近地面层气温模拟整体效果较好, 其中 48% 模拟的绝对误差低于 1℃, 75% 模拟的绝对误差低于 2℃, 不同高度上模型效率 ME 均大于 0.94; 夜晚气温的模拟效果优于白天的模拟效果, 白天 11:00—14:00 气温被过低估计, 并随着近地面层高度的增加, 模拟值误差越大; 近地面层内 3 种气温特征值模拟效果的优劣依次为: 日平均气温、日最低气温、日最高气温, 其中, 日平均气温模拟值与实测值基本吻合, 日最低气温被略微高估, 日最高气温被过低估计。此外, SHAW 模型在冬小麦拔节后 6 个生育期的模拟效果均存在差异, 拔节期、灌浆期和乳熟期模拟效果较好, 孕穗期和开花期次之, 抽穗期模拟效果相对较差。

关键词: 冬小麦 气温模拟 近地面层 SHAW 模型

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298 (2015) S0-0274-09

Simulation of Air Temperature within Winter Wheat
Near-ground Layer Based on SHAW Model

Liu Junming¹ Wang Nian¹ Wang Pengxin¹ Hu Xin² Huang Jianxi¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Wheat Research Institute, Shangqiu Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shangqiu 476000, China)

Abstract: The air temperature within near-ground layer is an important surrounding factor that can affect winter wheat growth. The simultaneous heat and water (SHAW) model, which is a detailed process model of heat and water movement in the plant – snow – residue – soil system, was evaluated in simulating the air temperature within near-ground layer from 0 cm to 40 cm at after-jointing stage of winter wheat. Field experiment was taken in Shangqiu City, Henan Province to observe the winter wheat growth and surrounding factors, such as air temperature. The SHAW model was calibrated and driven with inputs of part of field experiment data and empirical parameters. The results showed that the SHAW model performed well in simulating air temperature within near-ground layer in winter wheat field, with 48% of the absolute error of simulated values was less than 1℃, 75% of the absolute error of simulated values was less than 2℃, and the model efficiency at different heights was higher than 0.94. The simulated values had higher biases during the day than those at night and they were increased with the increase of height from ground, and their biases generally reached the largest value during 11:00 and 14:00. The daily mean values of the simulated and observed air temperature values were basically the same, while the daily lowest values were overestimated and the daily highest values were underestimated. The model had better effects at jointing, filling and dough stages than those at booting, blooming and heading stages.

Key words: Winter wheat Air temperature simulation Near-ground layer SHAW model

收稿日期: 2015-10-28 修回日期: 2015-11-18

* 国家自然科学基金资助项目(41471342)

作者简介: 刘峻明, 副教授, 博士, 主要从事地理信息系统和定量遥感研究, E-mail: liujunming2000@163.com

引言

作物近地面层小气候的变化在一定程度上影响作物的生长发育,并最终影响产量形成^[1]。在农业生产过程中,农业灾害会造成作物减产,例如干旱、霜冻害、病虫害等,上述灾害的发生不仅受到外界大环境的影响,更与近地面层气温变化密切相关。相较于气象台站百叶箱内测定的气温,近地面层内气温与作物的生理过程和生长状况联系得更为紧密,它通过影响光合、蒸腾、气孔导度、水汽和热量传输阻力等直接影响作物的生理进程^[2]。土壤-植被-大气连续体 (SPAC) 中的水热能量收支平衡影响着农田近地面层小气候中的温度要素,农田作物近地面层内气温主要决定于作物群体结构内不同茎叶层透入太阳辐射和湍流交换的对比关系^[3]。近地面层小气候受外界环境条件和自身活动的综合影响而动态变化,太阳辐射、湍流交换、群体结构特征、风速和作物发育时期等均会引起近地面层内气温的频繁变化,因而,了解和模拟近地面层内气温要素特征和动态变化具有一定难度。

通过机理性模型模拟近地面层内气温变化对了解作物的生理生态特性和对作物的生长发育进行实时监测具有重要意义。SHAW 模型是一维垂直多层水热耦合模型,该模型在大气层-植被层-积雪层-枯落层-土壤层系统中详尽模拟了水热运移过程^[4-6]。SHAW 模型是 SVAT 模型中机理性很强的代表模型之一,相较于作物生长模型 WOFOST、CERES 等侧重于对作物的生长、发育和产量的模拟与预测,SVAT 模型在模拟土壤-植被-大气系统中的能量流动和物质循环过程上有突出表现,它以大气层为上边界,土壤一定深度处为下边界,将系统划分为多个层次并计算每一层的水、热和溶质通量,在气象、水文、生态、植物和水土保持等学科上均有诸多应用^[7-9]。针对 SHAW 模型的适用性和有效性已有较多研究,大多数集中于土壤温度和土壤水分研究^[10-13],也有部分学者关注于植被层内蒸散量和能量平衡中各通量的研究,而较少对受水热能量收支平衡所决定的植被层内的气温进行直接模拟和验证^[14-18]。肖薇等^[19-20]应用 SHAW 模型模拟了中国科学院禹城综合试验站玉米作物层内的气温,然而仅利用了 3 d 的模拟值与田间实测值对比,模拟时段过短。本文重点关注于 SHAW 模型对冬小麦近地面层内气温的模拟情况,主要是因为冬小麦在拔节期后进入营养生长和生殖生长的并进时期,幼穗所处的环境气温对小麦生长和产量形成有很大影响,从第一节间开始伸长至穗下节快速伸长,幼穗高

度在近地面层 0 ~ 40 cm 内不断上升,幼穗本身长度也在不断增加,由于主茎和各分蘖在发育进程上存在差异,使得麦田内幼穗并不固定在某一高度上。因此,本文在 2015 年田间实验的基础上,利用冬小麦拔节期至乳熟期的连续观测数据,检验 SHAW 模型在河南省商丘地区冬小麦近地面层内气温的模拟效果,并对模型做出评价。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河南省商丘地区地处黄淮平原腹地,是黄淮麦区主要种植区和高产区之一,然而小麦生育期间常出现干旱、低温冷害、晚霜冻害、干热风等农业气象灾害^[21]。该地区属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均日照时数为 2 205 ~ 2 428 h,年均气温在 14℃ 左右,年均降水量 623 mm,年均无霜期约 211 d。土壤类型以潮土为主,地力属中上等水平,土层深厚,适耕期长。冬小麦播种时间一般在 10 月上中旬,12 月中旬后进入越冬期,次年 2 月下旬开始返青,拔节期在 3 月中下旬,4 月中下旬抽穗,5 月底至 6 月初小麦成熟。

1.2 田间实验与数据采集

田间实验在河南省商丘农林科学研究所双八实验站开展,该站地处北纬 34° 31' 55",东经 115° 42' 37",海拔高度 50.1 m。选取长势良好的冬小麦田块为观测场地,田块内部均匀,地势平坦,水分和肥料供应充足,实验田范围有效覆盖了空气动力风浪区。实验田内冬小麦种植品种为豫麦 18 号,播种日期为 2014 年 10 月 15 日。

2015 年 4 月 3 日—5 月 30 日在实验田中随机取 3 个样点进行定位观测:①近地面层 0 ~ 40 cm 高度间的气温观测。温度传感器的安装高度依次为 5、10、20、30、40 cm,传感器测量范围为 - 50 ~ 150℃。②上垫面的气象数据观测。在麦田土壤表面上方 2 m 高度处安装传感器每隔 1 h 测定气温、空气湿度、风速和太阳辐射强度。每小时降水量数据从中国天气网 (<http://www.weather.com.cn/>) 下载记录。③土壤垂直分层处的温度和湿度数据观测。土壤温度和土壤水分传感器的埋藏深度从地表开始依次向下,深度为 0、5、10、20、30、40 cm,并使用支架进行固定,减少传感器的下沉现象,同时定期对土壤取样测定其含水率,用来实时校正土壤水分传感器误差。④生物指标观测。在观测时段内,每隔 5 d 对株高、叶宽、根系深度及各深度层内根系所占比例、幼穗所在高度、地上部分的干生物量进行测定,利用比叶重法每隔 7 d 对冬小麦的叶面积指数

(LAI)进行测定。⑤冬小麦生育期界定。通过田间观察结合显微镜下观察幼穗的形态特征变化准确获得实验田中冬小麦进入拔节期、孕穗期、抽穗期、开花期、灌浆期和乳熟期的时间。⑥土壤理化参数测定。观测的冬小麦田块土壤剖面质地较为均匀,在样地内挖取 50 cm 深的剖面,测定土壤机械组成、容重等参数。

1.3 SHAW 模型

1.3.1 关键过程的计算

本文研究重点为 SHAW 模型对冬小麦近地面层内气温的模拟情况,所述的近地面层集中在植被层的中下部分,故以下主要为植被层中水热运移的原理描述^[22]。

(1) 植被层内的热量通量

植被层内热量通量的传输主要通过不同交换面(交换面可以是植被层顶部,植被层剖面的某节点或者土壤表面,其选择依赖于模型中所设置的植被系统节点高度)上的温度差进行热量传递,其公式为

$$\rho_{\alpha}c_{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left(\rho_{\alpha}c_{\alpha}k_e\frac{\partial T}{\partial z}\right)+H_l\tag{1}$$

其中
$$H_l=-\rho_{\alpha}c_{\alpha}L_{Al}\frac{T_l-T}{r_h}\tag{2}$$

式中 ρ_{α} ——空气密度,kg/m³
 c_{α} ——空气比热容,J/(kg·℃)
 T ——气温,℃ t ——时间,s
 z ——交换面高度,m
 k_e ——植被层内热量通量或水汽通量的传递系数,m²/s
 H_l ——叶片传输至空气的热量通量,W/m²
 L_{Al} ——叶面积指数 T_l ——叶温,℃
 r_h ——叶片对流传输阻力,s/m

(2) 植被层内的水汽通量

植被层中的水汽传输方程与热量传输方程类似,不同之处在于其是由水汽密度变化引起,其公式为

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left(k_e\frac{\partial \rho_v}{\partial z}\right)+E_l\tag{3}$$

其中
$$E_l=L_{Al}\frac{\rho_{vs}-\rho_v}{r_s+r_h}\tag{4}$$

式中 ρ_v ——水汽密度,kg/m³
 E_l ——叶片传输至空气的水汽通量,kg/(m²·s)
 ρ_{vs} ——叶片气孔腔内水汽密度,kg/m³
 r_s ——气孔阻力,s/m

(3) 植被层内的蒸腾作用

植被层内的蒸腾作用被认为是一个土壤-作物-

大气的闭合连续系统,其表达式为

$$T_r=\sum_{k=1}^{N_s}\frac{\psi_k-\psi_x}{r_{r,k}}=\sum_{i=1}^{N_c}\frac{\psi_x-\psi_{l,i}}{r_{l,i}}=\sum_{i=1}^{N_c}\frac{\rho_{vs,i}-\rho_{v,i}}{r_{s,i}+r_{h,i}}L_i\tag{5}$$

式中 T_r ——蒸腾速率,kg/(m²·s)
 N_s 、 N_c ——土壤层、植被层的节点个数
 ψ_k 、 ψ_x 、 $\psi_{l,i}$ ——土壤节点 k 处、植物木质部 x 处、植被层节点 i 处的水势,m
 $r_{r,k}$ ——根部到土壤节点 k 处的水流传输阻力,m³·s/kg
 $r_{l,i}$ ——植被层节点 i 处的水流传输阻力,m³·s/kg
 $\rho_{vs,i}$ ——植被层节点 i 处的叶片气孔腔内水汽密度,kg/m³
 $\rho_{v,i}$ ——植被层节点 i 处的空气水汽密度,kg/m³
 $r_{s,i}$ ——植被层节点 i 处的叶片气孔阻力,s/m
 $r_{h,i}$ ——植被层节点 i 处的叶片对流传输阻力,s/m
 L_i ——植被层节点 i 处的叶面积指数

1.3.2 模型本地化标定

SHAW 模型所需输入的主要参数有 3 方面。

(1) 模拟地点的位置信息:主要为实验地点的纬度、坡度、坡向数据。

(2) 植物生物物理特征参数:SHAW 模型关于近地面层气温的模拟,进行本地化标定后的参数见表 1,植被层内辐射平衡和水汽能量平衡与植物参数密切相关,因此准确标定冬小麦生物物理特征参数是准确模拟冬小麦近地面层温度的重要前提。单位 LAI 可拦截和存储的最大降水量和植物叶向系数的取值来源于模型对冬小麦作物所设定的典型值。植物反照率决定着植被层内所接收的整体辐射量,结合模型的推荐值与商丘冬小麦的生长性状,经过反复调试后确定为 0.25。植物蒸腾的最低温度是商丘地区早春植物开始进行蒸腾作用的气温。无水胁迫下的气孔阻力 r_{so} 、连接气孔阻力与叶水势的经验指数 n 和临界叶水势 ψ_c 是计算植被层蒸腾作用中气孔阻力 r_s 的 3 个重要参数,气孔阻力 r_s 对植被层中的水分通量和蒸腾作用有直接影响,模型采用 Campbell 提出的经验方程^[23]来表达三者的关系,其公式为

$$r_s=r_{so}[1+(\psi_l/\psi_c)^n]\tag{6}$$

式中 ψ_l ——植被层某节点处的叶水势,m

综合模型的推荐值和相关文献中商丘地区冬小麦的气孔阻力参数取值等,以实测近地面层气温为目标函数,在合理参数范围内反复调试以上 3 个参数,比较模型的模拟值和实测值,将两者吻合度最高

时的参数确定为最优参数。植物叶片阻力和植物根系阻力同样在模型对冬小麦所确定的取值范围内经过反复调试确定。

表 1 冬小麦生物物理特征参数

Tab.1 Biophysical characteristics parameters of winter wheat		
参数	定义	取值
ITYPE	植物蒸腾类型(1:蒸腾;2:无蒸腾)	1
PINTRCP	单位 LAI 可拦截和存储的最大降水量/mm	1
XANGLE	植物叶向系数	0.96
CANALB	植物反照率	0.25
TCCRIT	植物蒸腾的最低温度/℃	7
RSTOMO	无水胁迫下的气孔阻力/(s·m ⁻¹)	100
RSTEXP	连接气孔阻力与叶水势的经验指数	5
PLEAFO	临界叶水势/m	-200
RLEAFO	植物叶片阻力/(m ³ ·s·kg ⁻¹)	1.5×10 ⁵
RROOTO	植物根系阻力/(m ³ ·s·kg ⁻¹)	3.0×10 ⁵

注:临界叶水势(PLEAFO)指气孔阻力为最小值的2倍时的叶水势。

(3)土壤理化参数和水力特性参数:SHAW 模型所需输入的土壤理化参数(土壤粒径组成、土壤容重、土壤饱和含水率)在实验麦田中测定,观测地点的冬小麦田块土壤剖面质地较为均匀,土壤类型为潮土,砂粒含量为 30.3%,粉粒含量为 40.5%,粘粒含量为 29.2%(质量分数),有机质质量分数为 0.5%,平均容重为 1.42 kg/m³,饱和含水率为 0.49 m³/m³。模型中的土壤水力特性参数包括饱和导水率 K_s ,空气进入势 ψ_e 和孔径大小分布指数 b ,直接测定这些参数比较困难,本文选择通过 Campbell 提出的由土壤的结构、容重、颗粒组成等基本特性所建立的经验方程来计算水力特性参数^[23],计算得饱和导水率 K_s 为 0.298 cm/h,空气进入势 ψ_e 为 -0.1 m,孔径大小分布指数 b 为 3。

1.4 数据分析

为评价模型的模拟效果,分别用模型效率^[24](Model efficiency, ME)、均方根误差(Root mean square error, RMSE)、平均误差(Mean bias error, MBE)、平均绝对误差(Mean absolute error, MAE)来评价模型模拟近地面层垂直方向上气温的精度。ME 与回归方程中的决定系数(R^2)类似,不同的是其取值范围为(-∞,1),当 ME 越接近 1 时,代表模型的模拟效果越好。

2 结果与分析

2.1 近地面层不同高度气温模拟

利用 SHAW 模型模拟 2015 年 4 月 3 日—5 月 30 日冬小麦近地面层垂直方向上 5、10、20、30、

40 cm 高度的气温,比较模拟值和实测值发现,SHAW 模型在不同高度上的气温模拟效果整体较好(图 1)。具体分析其模型效率(ME)、均方根误差(RMSE)、平均误差(MBE)可知,近地面层不同高度上 ME 均大于 0.94;5、10、20、30 cm 高度的 RMSE 较为接近,分别为 1.77、1.84、1.90、1.78℃,表明其模拟差异幅度类似,而在 40 cm 处模拟差异幅度稍大,RMSE 为 2.17℃。从图中可以看出,气温低于 8℃时,MBE 为负值,模拟值大于实测值的点所占比例较多;气温在 8~30℃范围时,模拟值和实测值吻合程度较高;当气温高于 30℃时,MBE 为正值,普遍存在模拟值小于实测值的现象。表明 SHAW 模型对近地面层内气温模拟整体情况较好,但在低温模拟上存在稍微偏高趋势,在高温模拟上存在偏低趋势。

进一步分析 SHAW 模型模拟冬小麦近地面层不同高度气温的绝对误差,将模拟值与实测值进行差值处理,并按照误差值的不同区间进行统计,结果如表 2 所示,平均模拟误差 48% 控制在 1℃以内,27% 处于 1~2℃之间,14% 处于 2~3℃之间,11% 模拟误差超过 3℃。一般认为模拟误差在 1℃以内为很好,1~2℃范围内较好,2~3℃范围内较差,大于 3℃则模拟很差。从整体上看,可认为 SHAW 模型在近地面层 0~40 cm 高度的气温模拟效果中,75% 处于较好以上水平,误差可控制在 2℃以内。结合 ME、RMSE、MBE 和 MAE 的分布概率统计可以看出,SHAW 模型可有效模拟冬小麦近地面层不同高度上的气温,除 40 cm 高度的气温模拟效果较差外,其他各层的气温模拟效果均较好。

2.2 近地面层内气温日变化模拟

影响近地面层内气温的主要因素是太阳辐射和湍流交换强度,太阳辐射强度随着太阳高度角而处于不断变化之中,SHAW 模型以小时为步长进行模拟时,不同时刻太阳辐射和近地面层小气候的变化会导致近地面层内气温同样表现出显著的日变化差异,故进一步分析模型在不同时刻的气温模拟表现。在所有模拟天数中分析一日内每时刻的 RMSE 变化趋势(图 2)可以看出,近地面层 0~40 cm 高度上 RMSE 在 20:00—次日 06:00 逐渐变小,RMSE 均小于 2.1℃,模拟效果较好。白天 RMSE 表现出较大的波动性,除近地面层 5 cm 高度外,其余高度在 07:00—14:00 时段内的 RMSE 变化曲线整体呈倒 V 型,同时 RMSE 随着近地面层高度的增加而逐渐变大,RMSE 较大的时刻 11:00—13:00 同时也是一日中冬小麦接收太阳净辐射量最大的时刻。从总体上看,SHAW 模型能较好地模拟夜晚冬小麦近地面

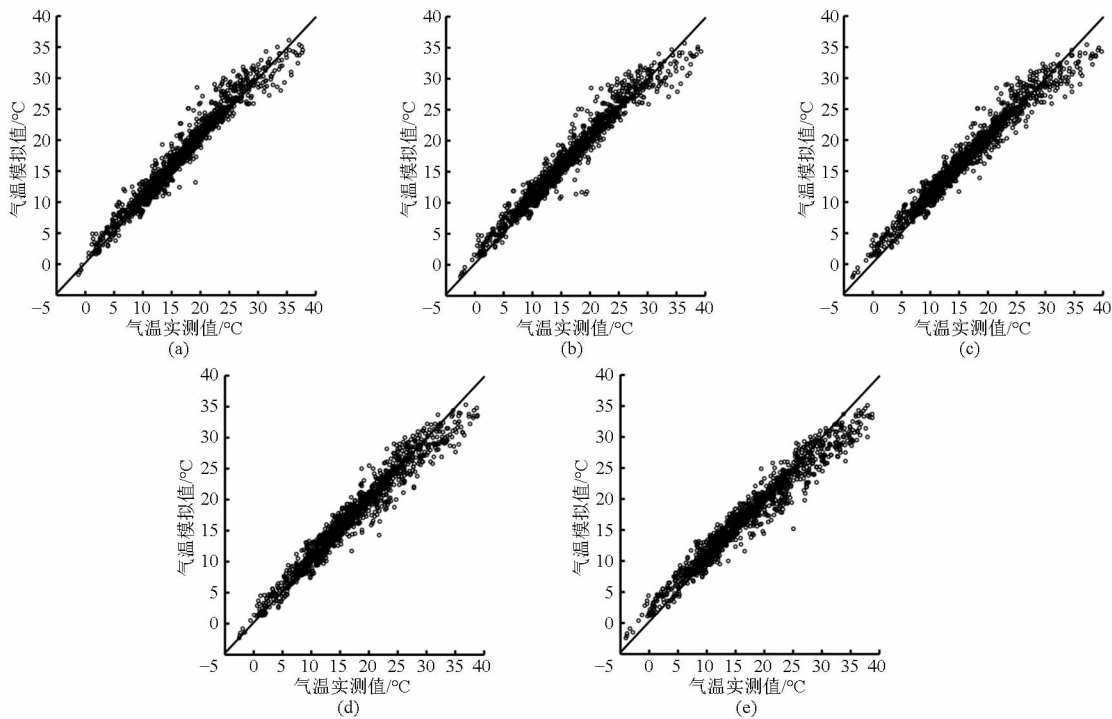


图 1 2015 年 4 月 3 日—5 月 30 日冬小麦近地面层不同高度气温模拟值和实测值对比

Fig.1 Comparison of simulated and measured air temperature at different heights within winter wheat near-ground layer from Apr.3rd to May 30th of 2015

(a) 5 cm (b) 10 cm (c) 20 cm (d) 30 cm (e) 40 cm

层内气温,在日出前后和日落前后的模拟效果最好,白天气温的模拟效果差于夜晚的模拟效果。

表 2 近地面层不同高度气温模拟值与实测值的差值统计

Tab.2 Difference between simulated and measured air temperatures at different heights within winter wheat near-ground layer						
高度/ cm	[0℃,1℃) [1℃,2℃) [2℃,3℃) [3℃,4℃) [4℃,5℃) [5℃,∞)					
5	50.31	28.91	12.09	4.57	2.17	1.94
10	49.07	28.53	13.10	5.12	2.33	1.86
20	44.57	28.37	15.74	7.29	2.40	1.63
30	52.02	25.35	12.87	6.12	1.94	1.71
40	43.72	24.65	14.81	9.30	4.34	3.18

分析图 3 近地面层不同高度气温日变化模拟的平均误差 MBE 可以看出,近地面层 5~30 cm 高度的 MBE 变化趋势较为一致,在 06:00—18:00 时段内,MBE 曲线的变化呈两边较缓中间较陡的 W 型曲线,在 08:00 和 15:00 左右形成 2 个较小的波谷,12:00 形成一个较大的波峰;近地面层 40 cm 高度的 MBE 变化曲线在 11:00—12:00 呈现一个较大的波峰,在 12:00 时 MBE 达到最大为 3.17℃,19:00—20:00 呈现一个较小的波谷。在 08:00—15:00 内,近地面层从 40 cm 高度往下至 5 cm 高度其 MBE 依次由负转正,表明在这一时间段内,SHAW 模型对气温过低估

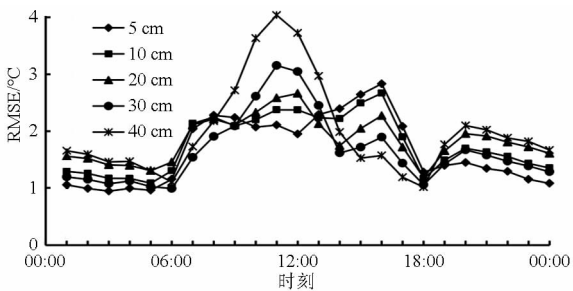


图 2 日际变化中冬小麦近地面层不同高度气温模拟均方根误差 RMSE 对比

Fig.2 Hourly root mean square error between simulated and measured air temperatures at different heights within winter wheat near-ground layer

计,并在正午时分,随着高度的增加,其模拟误差越大,一日中近地面层内气温出现较大值的时刻也多出现在这一时间段内,这与前面所述当气温高于 30℃ 时模拟值偏低的结果相一致。

综合分析近地面层垂直高度上气温模拟的 RMSE 和 MBE 日变化曲线,可以看出 SHAW 模型在夜晚的模拟效果优于白天,夜晚的气温模拟较为稳定。原因可能是:①夜间无太阳辐射,在能量平衡方程中可减少因计算短波辐射所引起近地面层内气温变化这一项的误差。②夜间冬小麦近地面层内湿度较大,气温的变化幅度远小于白天的变化幅度。SHAW 模型在白天的气温模拟效果呈现较大波动现象,其中模拟误差的变化时间均与太阳辐射量有关,

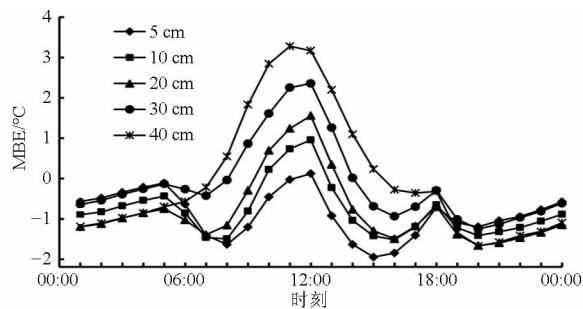


图3 日际变化中冬小麦近地面层不同高度气温模拟误差 MBE 对比

Fig.3 Hourly mean bias error between simulated and measured air temperatures at different heights within winter wheat near-ground layer

07:00 和 19:00 是 RMSE 和 MBE 变化曲线的拐点, 对应于太阳辐射开始影响近地面层内气温的临界时刻;11:00—13:00 则是一日中太阳辐射量最大的时刻,RMSE 和 MBE 均在此时段内出现最大值。由于太阳辐射量直接影响近地面层内的气温变化,模拟效果的下降表明 SHAW 模型在白天太阳辐射量较大、辐射量出现和消失的临界时刻,对近地面层内气温的模拟效果不理想。

2.3 气温特征值模拟

冬小麦在生长过程中,近地面层小气候影响着冬小麦生长发育过程,近地面层垂直方向上的气温要素是与冬小麦直接接触的环境气温,近地面层内的最低气温、最高气温和平均气温与冬小麦抗冻能力、耐高温能力和生长发育所需积温等都密切相关,分析一日内的气温特征值对于冬小麦的生长发育更具代表意义。将冬小麦拔节后持续 58 d 的近地面层不同高度上气温进行对比,SHAW 模型关于近地面层不同高度上日最低气温、日最高气温、日平均气温的模拟值与实测值比较如图 4 所示,ME、RMSE、MBE、MAE 的统计分析如表 3 所示。模型在近地面层内对日最低气温的模拟效果存在差异,近地面层 5、10、30 cm 高度的 ME 均大于 0.91, MAE 均小于 1.2℃; 20 cm 和 40 cm 高度的日最低气温模拟效果有所下降,ME 下降至 0.86 和 0.85, MAE 平均为 1.6℃。总体上看模型可很好地模拟日最低气温的变化趋势,但 MBE 均小于 0,模拟值大于实测值,说明模型存在略微高估近地面层内最低气温的问题。

近地面层内日最高气温模拟误差较大,总体上被过低估计,模拟效果整体上差于模型对近地面层内日最低气温的模拟。由表 3 可知,近地面层各高度 ME 平均值为 0.82,随着高度的上升,RMSE 和 MAE 均逐渐增大,模拟效果变差。分析其原因可能是:①模型在不同天数所表现出的误差不同与冬小

麦所处的生育期有关,小麦在生长初期、生长旺盛时期、成熟期的气孔阻力是不断变化的,且相差较大。②近地面层内气温的模拟与叶温的模拟密切相连,在实际情况中冬小麦气孔阻力的日变化呈 W 型^[25],在 14:00 左右会出现一个峰值,此时也是一日中气温最大的时刻,当气孔阻力增加时,叶片蒸腾速率降低,导致叶温升高,而 SHAW 模型中假定无水分胁迫下的气孔阻力为恒定值,忽略了其日变化过程,可能导致在中午时分气孔阻力偏小,模拟的叶温也会小于实测值,而模型为维持近地面层系统内整体的叶能量平衡,气温的模拟值会随着叶温模拟值的偏低而偏低。因此在日最高气温的模拟上多出现模拟值小于实测值。

近地面层内日平均气温模拟误差很小,在不同高度上其模拟值与实测值均吻合得很好,分析表 4 可知,ME 平均值高达 0.96, MAE 平均值为 0.79℃。RMSE 和 MAE 均随着近地面层高度的增加而减小,表明在日平均气温的模拟上,越靠近近地面层顶部其模拟效果越好;从总体上看,近地面层各高度的日平均气温模拟效果均很好,优于日最低气温和日最高气温的模拟情况。

2.4 冬小麦不同生育期近地面层气温模拟

冬小麦在开始拔节后处于快速生长阶段,群体密度、株高、干生物量、叶宽和 LAI 等均处于快速动态变化中,近地面层结构的阶段性变化将加剧近地面层内气温变化的不确定性,因此将所模拟的总天数划分为 6 个生育期:拔节期(4 月 3—12 日)、孕穗期(4 月 12—20 日)、抽穗期(4 月 20—25 日)、开花期(4 月 25 日—5 月 3 日)、灌浆期(5 月 3—24 日)、乳熟期(5 月 24—30 日),分析 SHAW 模型在不同生育期的模拟效果是否存在差异。比较 SHAW 模型在冬小麦不同生育期的近地面层内气温模拟效果,由表 4 可知,在不同高度上,6 个生育期内的 ME 变化均呈 V 型曲线,ME 最小值均出现在冬小麦抽穗期,其 ME 为 0.66 ~ 0.87, MAE 平均值为 2.6℃,表明抽穗期内 SHAW 模型模拟误差较大,气温模拟效果较差;孕穗期和开花期的近地面层内气温的模拟效果优于抽穗期,MAE 平均值分别为 1.81℃ 和 1.85℃,ME 在 0.78 ~ 0.89 之间变化;气温模拟效果较好的有拔节期、灌浆期和乳熟期,在近地面层不同高度 ME 平均值分别为 0.86、0.90、0.91, MAE 平均值分别为 1.59、1.63、1.59℃, RMSE 均在 2.05 ~ 2.53℃ 范围内波动, MBE 在 -1 ~ 1℃ 范围内波动。综合其评价指标,分析 SHAW 模型在 6 个生育期的气温模拟效果可知,拔节期、乳熟期和灌浆期模拟效果较好,孕穗期和开花期次之,抽穗期模拟结果相差

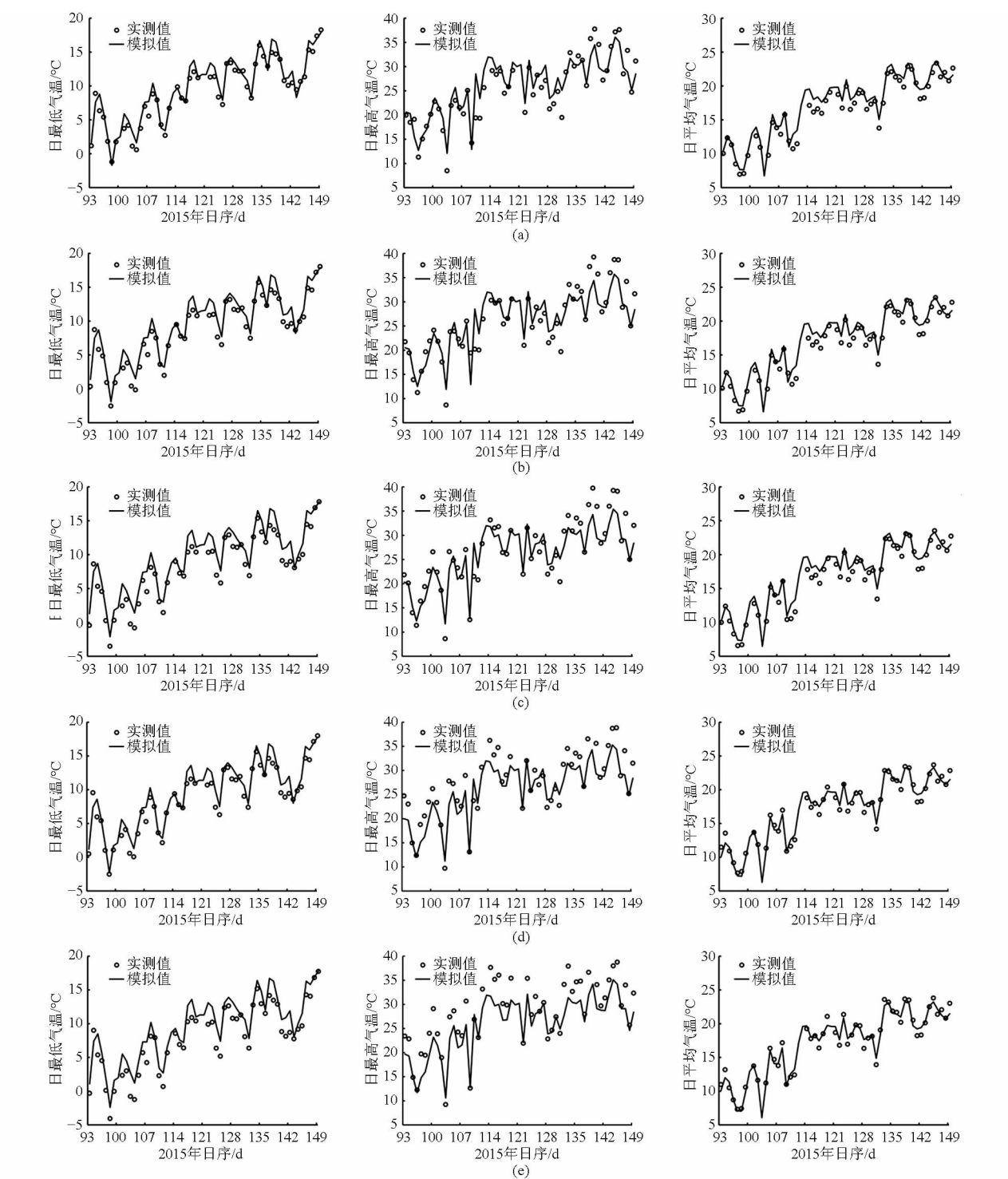


图 4 冬小麦近地面层不同高度日最低气温、日最高气温、日平均气温的模拟值与实测值比较

Fig. 4 Comparison of simulated and measured daily minimum, maximum and average air temperatures at different heights within winter wheat near-ground layer

(a) 5 cm (b) 10 cm (c) 20 cm (d) 30 cm (e) 40 cm

表 3 冬小麦近地面层不同高度气温特征值模拟结果统计分析

Tab. 3 Statistical analysis of simulated characteristic values of air temperature at different heights within winter wheat near-ground layer

高度/cm	日最低气温				日最高气温				日平均气温			
	ME	RMSE/°C	MBE/°C	MAE/°C	ME	RMSE/°C	MBE/°C	MAE/°C	ME	RMSE/°C	MBE/°C	MAE/°C
5	0.94	1.11	-0.65	0.89	0.85	2.55	-0.67	1.94	0.94	1.11	-0.86	0.97
10	0.91	1.45	-1.10	1.19	0.83	2.76	0.15	2.05	0.95	1.08	-0.79	0.94
20	0.86	1.81	-1.51	1.55	0.86	2.65	0.76	2.03	0.95	1.05	-0.79	0.90
30	0.92	1.36	-0.91	1.07	0.81	2.90	1.74	2.35	0.98	0.70	-0.12	0.56
40	0.85	1.93	-1.61	1.67	0.75	3.57	2.80	2.97	0.98	0.73	-0.02	0.57

表 4 不同生育期冬小麦近地面层不同高度
气温模拟结果统计分析

Tab.4 Statistical analysis of simulated air temperature
at different heights within winter wheat near-ground
layer at different growing stages

高度/cm	指标	拔节期	孕穗期	抽穗期	开花期	灌浆期	乳熟期
5	ME	0.83	0.81	0.66	0.78	0.89	0.91
	RMSE/℃	2.18	2.50	3.91	2.66	2.16	2.05
	MBE/℃	-0.62	-0.95	-2.01	-1.22	-0.85	-0.20
	MAE/℃	1.46	1.84	2.82	1.74	1.51	1.34
10	ME	0.87	0.82	0.72	0.81	0.89	0.90
	RMSE/℃	2.12	2.66	3.84	2.63	2.27	2.26
	MBE/℃	-0.65	-0.80	-1.85	-1.10	-0.78	-0.05
	MAE/℃	1.44	1.90	2.70	1.73	1.62	1.55
20	ME	0.87	0.85	0.77	0.83	0.90	0.90
	RMSE/℃	2.22	2.54	3.78	2.67	2.31	2.39
	MBE/℃	-0.59	-0.97	-1.70	-1.08	-0.74	-0.04
	MAE/℃	1.45	1.87	2.63	1.80	1.68	1.72
30	ME	0.87	0.89	0.85	0.87	0.92	0.92
	RMSE/℃	2.27	2.23	3.26	2.45	2.08	2.14
	MBE/℃	0.55	-0.04	-0.71	-0.37	-0.28	0.13
	MAE/℃	1.69	1.68	2.31	1.68	1.51	1.53
40	ME	0.87	0.89	0.87	0.87	0.91	0.91
	RMSE/℃	2.53	2.55	3.41	2.85	2.35	2.41
	MBE/℃	0.41	-0.07	-0.33	-0.11	-0.05	0.32
	MAE/℃	1.90	1.98	2.54	2.12	1.81	1.81

较大。说明冬小麦近地面层结构的变化会使得 SHAW 模型的模拟结果产生一定的差异,这主要是因为随着冬小麦的快速生长,植株内的水热传输阻力等参数在不同的生育期内是不同的,其中抽穗期为冬小麦叶面积指数达到最大的时期,也是植株需水量最大的时期之一,如果对该时期水热传输阻力等参数的标定出现偏差便会导致近地面层内气温模拟效果变差。

3 结论

(1)冬小麦近地面层内气温模拟整体效果较好,SHAW 模型模拟的近地面层 0 ~ 40 cm 高度中,不同高度上模型效率 ME 均大于 0.94,平均 48% 的模拟误差在 1℃ 以内,75% 模拟误差控制在 2℃ 以内。除 40 cm 高度的气温模拟效果较差外,其他各层的气温模拟效果均较好,但在所有模拟高度上均表现出低温时模拟值稍微偏高,高温时模拟值偏低 的趋势。

(2)SHAW 模型在一日内不同时刻模拟效果具有一定差异,夜晚的模拟情况整体优于白天,夜晚的气温模拟较为稳定,但存在略微高估近地面层内气温现象。SHAW 模型在 07:00—09:00、11:00—14:00、19:00—20:00 时段内较难准确模拟近地面层内气温变化,使得白天的模拟效果不稳定。在中午时刻气温较高时,近地面层内气温被过低估计现象严重,并且随着近地面层高度的增加,过低估计现象越为明显。

(3)冬小麦近地面层内日最低气温的模拟效果较好,其 ME 为 0.85 ~ 0.94, RMSE 为 1.11 ~ 1.93℃,模型存在略微高估近地面层内日最低气温问题;近地面层内日最高气温模拟误差较大,总体上被过低估计(5 cm 高度除外),其 ME 为 0.75 ~ 0.86, RMSE 为 2.55 ~ 3.57℃,模拟效果相对较差;近地面层内日平均气温的模拟值与实测值吻合度很好,其 ME 为 0.94 ~ 0.98, RMSE 为 0.70 ~ 1.11℃,模拟效果最好。

(4)SHAW 模型在 6 个不同生育期的模拟效果存在一定差异,其中拔节期、乳熟期和灌浆期模拟效果较好,孕穗期和开花期次之,抽穗期模拟效果较差。

参 考 文 献

1 孙淑娟,周勋波,陈雨海,等. 冬小麦种群不同分布方式对农田小气候及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(增刊2): 27 ~ 31.
Sun Shujuan, Zhou Xunbo, Chen Yuhai, et al. Effects of different distribution patterns of winter wheat's population on farmland micro-climate and yield[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(Supp.2): 27 ~ 31. (in Chinese)

2 翁笃鸣,陈万隆,沈觉成,等. 小气候和农田小气候[M]. 北京: 农业出版社, 1979: 228 ~ 231.

3 董振国. 农田作物层生态因子的研究方法[J]. 生态农业研究, 1995, 3(4): 54 ~ 57.
Dong Zhenguo. Research methods to the ecological factors of crop canopy[J]. Ecological Agricultural Research, 1995, 3(4): 54 ~ 57. (in Chinese)

4 Flerchinger G N, Hanson C L, Wight J R. Modeling evapotranspiration and surface energy budgets across a watershed[J]. Water Resources Research, 1996, 32(8): 2539 ~ 2548.

5 Flerchinger G N, Saxton K E. Simultaneous heat and water model of a freezing snow-residue-soil system I. theory and development [J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(2): 565 ~ 571.

6 Flerchinger G N, Saxton K E. Simultaneous heat and water model of a freezing snow-residue-soil system II. field verification[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(2): 573 ~ 578.

7 卫三平,王力,吴发启. SVAT 模型的研究与应用[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(2): 113 – 120.
Wei Sanping, Wang Li, Wu Faqi. Research and application of SVAT models[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(2): 113 – 120. (in Chinese)

8 罗毅,郭伟. 作物模型研究与应用中存在的问题[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 307 – 312.
Luo Yi, Guo Wei. Development and problems of crop models[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(5): 307 – 312. (in Chinese)

9 余冬立,邵明安,俞双恩. 黄土高原典型植被覆盖下 SPAC 系统水量平衡模拟[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5): 73 – 78.
She Dongli, Shao Ming'an, Yu Shuang'en. Water balance simulation in SPAC systems of slope lands covered with typical vegetations on Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 73 – 78. (in Chinese)

10 成向荣,黄明斌,邵明安. 基于 SHAW 模型的黄土高原半干旱区农田土壤水分动态模拟[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 1 – 7.
Cheng Xiangrong, Huang Mingbin, Shao Ming'an. Simulation of soil moisture dynamics in croplands using SHAW model in the semi-arid region of the Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 1 – 7. (in Chinese)

11 李瑞平,史海滨,赤江刚夫,等. 基于 SHAW 模型的内蒙古河套灌区秋浇节水灌溉制度[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 31 – 36.
Li Ruiping, Shi Haibin, Takeo Akae, et al. Scheme of water saving irrigation in autumn based on SHAW model in Inner Mongolia Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 31 – 36. (in Chinese)

12 尹志芳,欧阳华,徐兴良,等. 基于 SHAW 模型对拉萨河谷冬小麦农田生态系统水分传输特征的模拟研究[J]. 生态学报, 2009, 29(4): 2010 – 2019.
Yin Zhifang, Ouyang Hua, Xu Xingliang, et al. Simulation of water transfer processes of winter wheat field ecosystem using SHAW in Lhasa river valley[J]. Acta Ecological Sinica, 2009, 29(4): 2010 – 2019. (in Chinese)

13 Li Yan, Zhou Jian, Wolfgang Kinzelbach, et al. Coupling a SVAT heat and water flow model, a stomatal-photosynthesis model and a crop growth model to simulate energy, water and carbon fluxes in an irrigated maize ecosystem[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 176: 10 – 24.

14 Flerchinger G N, Xiao W, Sauerc T J, et al. Simulation of within-canopy radiation exchange[J]. NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences, 2009, 57: 5 – 15.

15 Bullied W J, Flerchinger G N, Bullock P R, et al. Process-based modeling of temperature and water profiles in the seedling recruitment zone; Part I. model validation[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 188: 89 – 103.

16 Yu Q, Flerchinger G N, Kozak J, et al. Energy balance simulation of wheat canopy using the RZ – SHAW (RZWQM – SHAW) model[J]. Transactions of the ASAE, 2007, 50(5): 1507 – 1516.

17 Zhang Yinsheng, Ohata T, Zhou J, et al. Modelling plant canopy effects on annual variability of evapotranspiration and heat fluxes for a semi-arid grassland on the southern periphery of the Eurasian cryosphere in Mongolia[J]. Hydrological Processes, 2011, 25(8): 1201 – 1211.

18 Fang Q X, Ma L, Flerchinger G N, et al. Modeling evapotranspiration and energy balance in a wheat-maize cropping system using the revised RZ – SHAW model[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 194: 218 – 229.

19 肖薇,郑有飞,于强. 基于 SHAW 模型对农田小气候要素的模拟[J]. 生态学报, 2005, 25(7): 1626 – 1634.
Xiao Wei, Zheng Youfei, Yu Qiang. Evaluation of SHAW model in simulation energy balance, leaf temperature and micrometeorological variables within a maize canopy[J]. Acta Ecological Sinica, 2005, 25(7): 1626 – 1634. (in Chinese)

20 Xiao Wei, Flerchinger G N, Yu Qiang, et al. Evaluation of the SHAW model in simulating the components of net all-wave radiation[J]. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2006, 49(5): 1351 – 1360.

21 张艳玲. 河南省商丘 51 年来气候变化特征分析[J]. 河南科学, 2013, 31(8): 1262 – 1266.
Zhang Yanling. Climate variation characteristics in recent 51 years in Shangqiu, Henan Province[J]. Henan Science, 2013, 31(8): 1262 – 1266. (in Chinese)

22 Flerchinger G N, Reba M L, Link T E, et al. Modeling temperature and humidity profiles within forest canopies[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 213: 251 – 262.

23 Campbell G S. Soil physics with BASIC; transport models for soil-plant systems[M]. Amsterdam: Elsevier, 1985.

24 Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models; Part I—a discussion of principles[J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282 – 290.

25 康绍忠,刘晓明,熊运章. 土壤-植物-大气连续体理论[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.