doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.018

基于 SHAW 模型的冬小麦叶温模拟

刘峻明^{1,2} 崔珍珍^{1,2} 潘佩珠^{1,2} 王鹏新^{1,2} 胡 新³

(1.中国农业大学信息与电气工程学院,北京 100083; 2.农业部农业灾害遥感重点实验室,北京 100083;3.商丘市农林科学院小麦研究所,商丘 476000)

摘要: 叶温是反映冬小麦健康状况的关键指标,但获取麦田叶温动态变化过程及廓线分布存在着较大困难。本文 以河南省商丘市为研究区,引入表达土壤-植被-大气能量传输的 SHAW 模型,对其进行本地化标定,在垂直方向上 0~60 cm 高度以 10 cm 为间隔进行分层,模拟冬小麦拔节期至抽穗期间的叶温时序曲线及廓线,并结合田间同期 不同高度的叶温实测数据,对模拟结果进行分析。结果表明:SHAW 模型可有效地用于麦田叶温时序曲线和廓线 模拟,决定系数达 0.847 6,夜间模拟效果显著优于白天,决定系数分别为 0.862 2 和 0.760 2。对叶温日平均值、最 低值和最高值的分析表明,均方根误差范围为 1.36~4.09℃,且最低温模拟效果最好,平均值次之,最高温误差最 大。叶温廓线模拟分析表明,各高度决定系数均达到 0.82 以上,且随高度的增加而增大,均方根误差范围为 2.41~ 3.35℃,平均误差均小于 0℃;叶温总体上呈现出夜间随高度增加而降低的趋势,而白天随高度增加而升高的趋势。 **关键词:** 冬小麦;叶温模拟;叶温廓线; SHAW 模型

中图分类号: S161 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017) S0-0110-08

Simulation of Winter Wheat Leaf Temperature Based on SHAW Model

LIU Junming^{1,2} CUI Zhenzhen^{1,2} PAN Peizhu^{1,2} WANG Pengxin^{1,2} HU Xin³

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

2. Key Laboratory of Remote Sensing for Agri-Hazards, Ministry of Agriculture, Beijing 100083, China

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

Abstract: Leaf temperature is the key factor that reflects the growth conditions of winter wheat, but it is difficult to obtain the dynamic variation and profile distribution of wheat field leaf temperature. The simultaneous heat and water (SHAW) model describes heat and water movement in a plant-snow-residuesoil system in detail. Taking Shangqiu as the study area, based on the localization, the SHAW model was used to simulate the leaf temperature time series curve and profile from 0 cm to 60 cm separated by 10 cm from jointing period to heading period of winter wheat. The simulation results were analyzed by combining with field observed data at the same time. The results showed that the SHAW model can be used effectively to simulate leaf temperature time series curve and profile, and the coefficient of determination reached to 0.847 6. The night simulation results were significantly better than the daytime, and the coefficient of determination were 0.862 2 and 0.760 2 respectively. The analysis of the average, minimum and maximum values of leaf temperature simulation showed that RMSE ranged from 1.36°C to 4.09 $^{\circ}$ C. The minimum temperature simulation effect was the best, and the average value was second, and the maximum temperature error was the greatest. The analysis of the leaf temperature profile showed that height decision coefficient all achieved above 0.82, and increased with the height. RMSE was ranged from 2.41 °C to 3.35 °C, and MBE were all less than 0 °C. The leaf temperature generally showed a tendency to decrease with the height in the night, while increase with the height during the day. Key words: winter wheat; leaf temperature simulation; leaf temperature profile; SHAW model

引言

叶片是小麦光合、呼吸、蒸腾等生理过程的重要

器官,是影响植株体表和体内物理、化学生物过程的 关键因子,也是小麦对外部环境反应最敏感的部位。 受太阳辐射、风速、湍流交换、群体结构特征和作物

收稿日期:2017-07-17 修回日期:2017-11-20

基金项目:国家自然科学基金项目(41471342)

作者简介:刘峻明(1972—),男,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

发育时期等诸多因素的影响,叶片温度与作物生理 过程和生长状况联系较为紧密,叶温及其变化可反 映植株体内的温度和水分状况,是反映作物整体健 康状况的重要参数^[1-3]。在作物霜冻害研究中,叶 温是判断作物受灾程度的理想指标^[4],其与作物的 抗霜性具有较好的相关性,当作物受霜冻害等低温 灾害影响后,叶片冻结后是否受到伤害主要取决于 最低叶温^[5]。由于作物群体结构和植株间光能分 布等因素的差异,植株昼夜间不同高度叶温差异较 大,且由于作物叶温测量和获取较为复杂,限制了其 在实际研究中的应用,所以通过机理性模型模拟作 物植株叶温及其动态变化过程,对了解作物生理生 态特性及作物长势监测具有重要意义。

SHAW(Simultaneous heat and water)模型是一 维垂直多层水热耦合模型,它是土壤-植被-大气传 输模型中机理性很强的代表模型之一,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。该模型将系统划分多个物理层,并详细 表述各层结构之间物质能量传输的物理过程,而且 模型分层结构可根据具体的土壤植被结构进行调 整,适用性强,被广泛应用于水文、气象、水土保持等 方面^[6-7]。在农业上,SHAW 模型也有较多应用,已 有研究表明,SHAW 模型能较好模拟华北平原中国 科学院禹城综合试验站玉米作物层内的能量平衡、 空气温度和相对湿度等^[1],且在模拟冬小麦幼穗层 不同高度不同生育期气温的变化特征时也有较好的 效果^[8]。

本文基于 SHAW 模型来模拟商丘地区大田冬 小麦的叶片温度,并结合田间观测实验,将模拟值 与实测值进行对比,分析评价 SHAW 模型对冬小 麦叶温的模拟效果,根据模拟结果结合时间序列 曲线和廓线分析叶温动态变化过程和变化特征, 为冬小麦长势监测和霜冻灾害监测等研究提供技 术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与实验设计

河南省商丘市地处黄淮地区,属暖温带季风气候,年平均气温在 14℃左右,年平均日照时数为 2 200~2 400 h,年降水量为 700 mm 左右。黄淮地 区冬小麦多种植冬性、弱冬性品种,一般在 9 月中下 旬至 10 月上旬播种,12 月中旬后进入越冬期,翌年 2 月下旬开始进入返青期,3 月中下旬进入拔节期,4 月中下旬进入抽穗期,5 月底至 6 月初成熟。3 月 到 4 月上旬,由于冷空气的入侵或地表骤然辐射冷却,冬小麦抗寒性降低,使得土壤表面、植物表面及

近地面空气层的温度骤降到0℃以下,低温强度常 常超过此时小麦的耐寒力,导致该地区晚霜冻害频 繁发生。

为获取田间冬小麦实测叶温数据,分别于 2014—2015年和2015—2016年冬小麦生长季在河 南省商丘市农林科学院试验示范中心开展田间叶温 观测实验,该实验基地位于平原地区,灌溉条件良 好,适耕期长,土壤类型以潮土为主,土层深厚,肥力 均匀,可确保冬小麦正常生长所需的营养。实验田 块内冬小麦种植品种为豫麦18号,播种日期分别为 2014年10月15日和2015年10月15日,行距 23 cm,株距1.4 cm,行长25 cm,播种方式是精播耧 播种。在实验田块内选取田间长势均匀的两个点, 分别分层安装多个接触式叶温传感器,观测拔节期 至抽穗期冬小麦冠层不同高度的叶温。叶温观测期 间通过取样方式同步测定冬小麦LAI、株高等生物 量指标;并在实验田块内挖取土壤剖面,划分土壤层 次,测定各层的机械组成、土壤容重等参数。

1.2 SHAW 模型及其标定

SHAW 模型是由 FLERCHINGERG 等^[9-10]建立 的,涵盖了植物冠层-雪被-凋落物-土壤表面到土壤 中某一具体深度的一维垂直剖面^[11-12]。模型以大 气层为上垫面,土壤一定深度为下垫面,详细描述了 各物理层中的辐射传输、湍流交换、水热传输以及土 壤冻融等物理过程^[13]。该系统分层设置较灵活,可 根据实际下垫面状况选择相应的物理层,每层均由 一个独立的节点表征,具有对热、水、溶质通量同步 计算和对土壤冻融过程详细描述的特点,被广泛应 用于农业等各个领域^[13-16]。

模型的理论核心是基于表面边界上的能量平 衡,其核心计算方程为

$$R_{n} + H + L_{v}E + G = 0$$
 (1)

式中 R_n —全波净辐射, W/m²

- H——感热通量

G——土壤或地表热通量,W/m²

E——土壤表面和作物冠层的总蒸发量, kg/(m²·s)

其中全波净辐射 R_n由长波和短波辐射构成,可以表示为

$$R_n = (1 - \alpha) S_d + L_d - \varepsilon \sigma T_s^4$$
(2)

式中 S_d ——向下短波波长, μ m

$$L_d$$
——长波辐射, μm

$$T_s$$
——地表温度, \mathfrak{C}

σ-----Stefan - Bolz-mann 常数

为准确模拟作物的生长发育过程,本研究对模型输入参数进行了标定。SHAW模型在模拟过程中 需要输入的主要相关参数有:实验区域位置信息,实 验地点的纬度为34°32′N,坡度、坡向均为0;土壤和 植被的相关输入参数通过文献来确定,土壤理化参 数和水力特性参数通过田间实测和查阅文献获取, 具体参数标定结果见表1、2。

表1 SHAW 模型	主要作物生长参数
------------	----------

Tab. 1	Main	crop	growth	parameters	of	SHAW	model
--------	------	------	--------	------------	----	------	-------

参数	定义	数值	来源
XANGLE	叶向系数	0.96	文献[17-19]
CANALB	植物反照率	0.2	文献[17-19]
TCCRIT	植物蒸腾的最低温度/℃	7	文献[17-19]
RSTOM0	无水分胁迫下的气孔阻力/(s·m ⁻¹)	100	文献[17-19]
RSTEXP	连接气孔阻力与叶水势的经验指数	5	文献[17-19]
PLEAF0	临界叶水势/m	- 200	文献[17-19]
RLEAF0	植物叶片阻力/(m ³ ·s·kg ⁻¹)	1.5×10^5	文献[17-19]
RROOT0	植物根系阻力/(m ³ ·s·kg ⁻¹)	3.0×10^{5}	文献[17-19]

表 2 SHAW 模型土壤理化参数和水力特性参数

	Tab. 2	Soil physical	and hydrauli	c characteristics	parameters	of SHAW	model
--	--------	---------------	--------------	-------------------	------------	---------	-------

参数	定义	数值	来源
Silt	粉粒质量分数/%	40. 5	田间实测
Sand	砂粒质量分数/%	30.3	田间实测
Clay	粘粒质量分数/%	29.2	田间实测
Organic matter	有机质质量分数/%	0.5	田间实测
Bulk density	容重/(kg·m ⁻³)	1.42	田间实测
Saturated volumetric water content	饱和含水量/(m ³ ·m ⁻³)	0.49	田间实测
Saturated conductivity	饱和导水率/(cm·h ⁻¹)	0. 298	文献[17]
Air-entry potential	空气进入势/m	- 0. 1	文献[17]
Campbell's pore-size distribution index	空隙大小分布指数	3	文献[17]

1.3 叶温模拟方式及效果评价

在对模型进行本地化标定的基础上,模型需要 的初始输入还包括上边界层的气象数据和下边界土 壤层的初始温度和含水率剖面的分布条件,其中上 边界气象数据的测定高度为2m。通过计算各层间 热量和水汽传输,并考虑叶片的热量来源和蒸腾作 用来确定热量和水汽量。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。 模型以小时为步长对冬小麦拔节期至抽穗期作物层 内叶温进行模拟,模拟日期为 2015 年 3 月 20 日— 2015 年 4 月 28 日(儒略日 79~118)和 2016 年 3 月 14 日—2016 年 4 月 22 日(儒略日 74~113),结合 田间实测数据对模拟值和实测值进行对比分析。

为评价模型的模拟效果,分别用决定系数 R²、 均方根误差 R_{MSE}^[20]、平均误差 M_{BE}来评价模型模拟 作物层垂直方向上叶温的精度,其公式为

$$R^{2} = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n} (X_{i} - \overline{X}_{i})(Y_{i} - \overline{Y}_{i})\right]^{2}}{\sum_{i=1}^{n} (X_{i} - \overline{X}_{i})^{2} \sum_{i=1}^{n} (Y_{i} - \overline{Y}_{i})^{2}}$$
(3)

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (Y_i - X_i)^2}$$
(4)

$$M_{BE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (X_i - Y_i)$$
 (5)

式中 X_i ——实测值 Y_i ——模拟值 \overline{X}_i ——实测平均值 \overline{Y}_i ——模拟平均值 N——观测样本数

2 结果与分析

2.1 叶温模拟效果分析

2.1.1 总体叶温模拟效果

将 2014—2015 年和 2015—2016 年冬小麦拔节 期至抽穗期的叶温模拟值与田间实测值进行对比, 分析模型在全天、夜晚(18:00 一次日 06:00)和白 天(06:00 - 18:00)的模拟效果,结果见图 1 和 表 3。

结合图 1 和表 3 可以看出,总体上叶温模拟效 果较好,趋势线与 1:1线较接近,决定系数达到 0.8476,均方根误差约为 3℃,平均误差为-0.89℃,



图 1 叶温模拟值与实测值对比

Fig. 1 Contrast between the leaf temperature simulation and measured values

表 3 叶温模拟结果统计分析

Tab. 3 Statistical analysis of the results of the

leaf temperature simulation

类别	决定系数	均方根误差/℃	平均误差/℃
全天	0.8476	3.04	- 0. 89
夜晚	0.8622	2.02	- 0. 30
白天	0.7602	3.78	- 1.82

存在着模拟值高估现象。对比夜晚和白天的叶温模 拟效果,可以看出夜晚模拟效果明显优于白天,决定 系数、均方根误差和平均误差等指标均好于白天,夜 间的趋势线与1:1线几乎重叠,平均误差仅为 -0.30℃,白天趋势线处于1:1线上方,其平均误差 为-1.82℃,表明模拟值普遍高于实测值,且模拟误 差大于夜晚。

模型对夜晚叶温模拟效果优于白天,且总体上 模拟值大于实测值,分析其原因可能是:①夜间空气 湿度大,蒸腾作用几乎停止,叶表露水形成的水汽层 凝结释放热量且阻碍了叶片与周围空气的辐射热交 换^[21],所以夜间叶温较稳定且模拟效果较好;日出 后,太阳辐射强度随着太阳高度角的变化而处于不 断变化之中,模拟误差的变化均与太阳辐射量有关, 故白天叶温有较大波动且模拟效果相对于夜晚较 差。②作物叶片上的气孔直接调控着作物蒸腾速 率,进而控制能量在 SVAT 系统中的分配和转 化^[22]。气孔阻力是模型平衡方程中一个重要影响 因素,模型在确定叶片气孔阻力特征值时并没有考 虑它的日变化规律,因此可能导致了模拟值与实测 值之间的差异。

2.1.2 不同高度叶温模拟效果

为分析 SHAW 模型对冬小麦垂直方向不同高 度叶温的模拟效果,绘制冬小麦各个高度层叶温模 拟值与实测值之间的散点图(图 2)。

由图 2 可以看出, SHAW 模型在不同高度上的 叶温模拟值和实测值拟合程度较好。各高度层线性 回归方程趋势线斜率 k 分别为 0.741 5、0.945 3、 0.958 8、1.093 3、1.108 9 和 1.132 4, 其数值随着高



Fig. 2 Contrast between the leaf temperature simulated and measured values at different heights of winter wheat

度层的增加而增大,同时叶温区间存在着从低温区 向高温区移动的趋势,表明总体上随着高度层的增 加叶温逐渐增大。由趋势线与1:1线的交点可以看 出,在10、20、30 cm高度层,低温区叶温模拟值普遍 高于实测值;在40、50、60 cm高度层,高温区叶温普 遍高于实测值。分析表明随着高度层的增加,叶温 总体上呈现出逐渐增加的趋势,在植株底部,模型存 在低温区高估和高温区低估的趋势;在植株顶部,模 型存在低温区低估和高温区高估的趋势。

分析模型评价指标可知(表4),各个高度层的 决定系数均大于 0.82,平均决定系数为 0.87,且整 体上呈现出增加的趋势,表明随着高度层的增加,模 拟值与实测值的拟合程度越来越好;均方根误差变 化范围为 2.41 ~ 3.35℃,整体上随着高度层的增加 而减小;平均误差均小于 0,表明整体上模拟值大于 实测值,且上层叶温的高估程度较大。这种高度上 模拟差异的出现是模型自身特性决定的,WILSON 等^[23]研究发现 K 理论中总存在过高估计冠层辐射 温度的现象,且模型模拟的是一维廓线,没有考虑水 平湍流交换,该局限在接近冠层顶时更明显,故模型 模拟值偏高且上层高估程度较大。

表 4 不同高度叶温模拟结果统计分析

 Tab. 4
 Statistical analysis of leaf temperature simulated

 valuesat different heights

高度/cm	决定系数	均方根误差/℃	平均误差/℃
10	0.8389	3.33	- 0. 91
20	0.8280	3.35	- 1. 28
30	0.8416	3.02	-0.87
40	0.8902	2.72	-0.97
50	0.9187	3.00	- 1. 34
60	0. 919 1	2.41	- 0. 78

2.1.3 叶温特征值模拟效果

为分析 SHAW 模型对冬小麦叶温特征值的模 拟效果,提取出冬小麦日最高叶温、日平均叶温和日 最低叶温模拟值,并与实测值分析比较,如图 3 和 表5 所示。





Fig. 3 Contrast of leaf temperature characteristic values between temperature simulated and measured values of winter wheat

由图 3 和表 5 看出,模型对日最低叶温的模拟 效果最好,趋势线与1:1线的吻合程度最高,决定系 数为 0.915 8,均方根误差为 1.36℃,平均误差为 -0.26℃,总体模拟值略大。模型对日平均叶温的 模拟效果较好,决定系数为 0.862 2,均方根误差为 2.24℃,平均误差为 -1.76℃,趋势线处于1:1线上 方,模拟值高于实测值;模型对日最高叶温的模拟误 差最大,趋势线与1:1线的偏离程度最大,决定系数 为 0.653 8,均方根误差为 4.09℃,平均误差为 -2.66℃。由于太阳辐射量的变化,模型中存在因计 算短波辐射所引起冠层内温度变化的误差,且温度 越高相对误差越大,所以总体上,模型对日最低叶温 和日平均叶温的模拟效果较好,而对日最高叶温的 模拟误差较大,表明 SHAW 模型在白天太阳辐射强 度较大时,日最高叶温的模拟效果相对较差。

2.2 叶温时序和廓线分析

2.2.1 时间序列分析

图 4 为 2015 年和 2016 年冬小麦拔节期至抽穗

表 5 冬小麦叶温特征值统计分析 Tab.5 Statistical analysis of leaf temperature characteristic values of winter wheat

类别	决定系数	均方根误差/℃	平均误差/℃
日最低叶温	0.9158	1.36	-0.26
日平均叶温	0.8622	2.24	- 1. 76
日最高叶温	0.6538	4.09	- 2.66

期 10~50 cm 高度层叶温模拟时序曲线。因在该生 育阶段冬小麦株高处于逐渐增长状态,所以模拟高 度在初期仅模拟 10~30 cm,后期逐渐增加至 40 cm 和 50 cm。由图 4 可以看出各高度层叶温呈现出相 同的变化趋势,即随着高度层的增加白天叶温逐渐 增加,叶温最大值出现在正午时刻 50 cm 高度层,不 同高度叶温有一定差异,计算得到在模拟日期内 2015 年和 2016 年白天各高度层之间最大温差分别 为 4.3℃和 3.1℃,且最大值出现在正午时刻;随着 高度层的增加夜间叶温逐渐降低,最低值出现在 50 cm 高度层,2015 年和 2016 年夜间各高度层最大



图 4 2015 年和 2016 年冬小麦不同高度叶温模拟时序曲线

Fig. 4 Time series curves of leaf temperature simulated values at different heights of winter wheat in 2015 and 2016

温差分别为 3.3℃和 2.2℃,各高度层之间叶温波动 幅度相对白天较小。

图 5 为 2015 年和 2016 年冬小麦拔节期至抽穗 期 10~50 cm 高度层日最高叶温和日最低叶温模拟 时序曲线。由图中可以看出,各高度层日最高叶温 和日最低叶温随高度的变化趋势相反,日最高叶温 随着高度层的增加逐渐增大,日最低叶温随着高度 层的增加逐渐减小,且高度越高温差越大,最高叶温 和最低叶温均出现在 50 cm 高度层。

2015 年模拟日期内植株底部 20 cm 和 10 cm 高 度层和植株顶部 50 cm 和 40 cm 高度层间日最高叶 温温差值分别为 0 ~ 1.4℃和 0.1 ~ 2℃,日最低叶温 温差值分别为 - 1.3 ~ -0.2℃和 - 0.8 ~ 0℃,随着 高度层的增加两相邻高度层间日最高叶温升温幅度 逐渐增大,日最低叶温降温幅度逐渐减小;2016 年 模拟日期内植株底部 20 cm 和 10 cm 高度层和植株 顶部 50 cm 和 40 cm 高度层间日最高叶温温差值分 别为 0 ~ 0.8℃和 0.3~1.5℃,日最低叶温温差值分 别为 0 ~ 0.8℃和 0.3~1.5℃,日最低叶温温差值分 别为 - 1.7~-0.1℃和 - 0.6~0℃,且随着高度层 的增加两相邻高度层间日最高叶温升温幅度逐渐增 大,日最低叶温降温幅度逐渐减小。分析表明,2015 年和 2016 年日最高叶温和日最低叶温时序曲线呈 现出相同的规律。

2.2.2 廓线分析

通过 SHAW 模型可以获取任一时间点冬小麦 叶温廓线,本文选取一个霜冻日的叶温廓线来进行 分析。2015 年 4 月 7—8 日(儒略日 97~98)商丘市 出现了明显的霜冻过程,商丘气象站测得的从 4 月 7 日中午至 8 日中午气温变化是 4 月 7 日最高气温 10.3℃至夜间最低气温为 4.6℃,8 日中午最高为





13.2℃,未反映出小麦受冻现象,图6给出了该天模 拟的不同时刻的叶温廓线,图中各折线上方数字代 表当日整点时刻。从图可看出,在24:00—03:00之 间,叶温从50 cm 至10 cm 随着高度逐渐降低,依次 进入0℃以下的受冻状态,到05:00 达到最低,然后 逐渐升温,在06:00—07:00 之间回升到0℃以上, 不同高度受冻时长达到3~6h,模拟结果比较完整 地反映了整个冬小麦受霜冻影响的过程。

由图6进一步可以看出,当日昼夜范围内叶温变





化幅度较大,从05:00时刻达到的最低叶温,至 12:00 时刻达到的最高叶温,最大温差为23℃,最高 叶温和最低叶温均出现在 50 cm 高度处。夜间各时 刻叶温最大温差为11℃,随高度的增加叶温逐渐减 小,但各高度层的降温幅度逐渐增加,50 cm 和 10 cm 高度层叶温降温幅度分别为 8.8℃和 7.1℃,这 是由于夜间地面作为热源使得近地面层空气温度下 降缓慢,所以同一高度叶温降温幅度较小;07:00 随着 光照强度的增加各高度层叶温迅速增加,上层叶片受 光使得 50 cm 高度层叶温迅速增加且出现逆温达到 最大值,随后夜晚过渡到白天,光照强度逐渐增强,叶 温随着高度的增加而逐渐增加。白天 08:00-10:00 时间内,叶片上布满露水,虽已见光,但因蒸发耗热, 叶温增加缓慢;待露水完全蒸发,由于太阳辐射对冠 层的加温作用,各高度层叶温迅速增加且冠层顶部叶 温高于低部,至中午太阳辐射最强时叶温达到最高 值,且升温幅度随着高度层的增加逐渐增加,各时刻 叶温最大温差为 13.5℃,50 cm 和10 cm 高度层叶温 升温幅度分别为12.6℃和11.2℃;日落前后随着光 照强度的减弱,大气温度开始回落,叶表温度迅速下 降,随后各高度叶温逐渐降低。

分析表明,随着高度层的增加白天叶温逐渐增加,夜晚叶温逐渐降低,白天叶温变化幅度大于夜晚,且夜间和白天同一高度层内上层叶温的降温幅度和升温幅度均大于下层。其他日期的叶温廓线也大致呈现相似的规律。

2.3 讨论

本研究中通过引用 SHAW 模型较好地模拟了 冬小麦叶温变化,模拟值和实测值的拟合趋势比较 接近。模型的研究和应用虽已取得了一定成效,但 仍存在一定局限。

白天植株叶片表面接收短波辐射,并与大气持续地交换长波辐射,夜晚地表作为热源向外部大气辐射热量,这种热量交换是能量平衡的驱动力,影响冠层叶片温度,并为光合作用和植物生长提供了能量。模型对地表能量辐射交换的模拟直接影响植物

冠层内部微气候的模拟状况,SHAW 模型假定植物 的冠层是均匀分布的,但实际情况中作物群体结构 等因素并不完全符合模型的假设,因此模型对潜在 热通量和土壤蒸散量的模拟出现一定误差。

由于模型对夜间净辐射损失的持续高估,造成夜 间蒸发蒸腾的预测不足,使得模型对潜在热通量的模 拟存在一定误差,但造成这种高估的原因尚不清楚; 模型对土壤蒸散量的模拟误差可能是由于模型对土 壤表面蒸发的过度预测,模型预测土壤表面有明显的 蒸发冷却作用,所以造成土壤表面温度明显偏低,且 在潮湿的土壤条件下,土壤辐射温度几乎没有变化, 但在干燥条件下有更多的变化,因此在不同的土壤水 分条件下,模型参数可能会被调整,从而模型对土壤 辐射温度的模拟也会出现误差。以上因素在一定程 度上均会影响叶温模拟结果的准确性,因此未来的研 究中需对模型进行更加准确的标定及描述。

3 结论

(1)SHAW 模型对冬小麦叶温的整体模拟效果 较好,模拟值较好地反映了实测值的变化,决定系数 为0.8476;夜晚和白天的决定系数分别为0.8622 和0.7602,模型在夜晚的模拟效果优于白天。

(2)各个高度层叶温模拟值和实测值决定系数 均大于 0.82,均方根误差变化范围为 2.41 ~ 3.35℃,平均误差均为负值,表明整体上各高度层模 拟效果较好,但存在模拟值大于实测值的现象,且上 层叶温的高估程度较大;模型对日平均叶温和日最 低叶温的模拟效果较好,模拟值和实测值的拟合程 度较高,而对日最高叶温的模拟效果相对较差。

(3)结合冬小麦叶温时序曲线和廓线分析可以 较好地反映叶温在时间和垂直方向的动态变化过 程。冬小麦昼夜间不同高度叶温呈现出相同的变化 趋势,白天随着高度的增加叶温逐渐升高,并于正午 时刻达到最大值,夜晚叶温随着高度层的增加逐渐 降低,变化幅度小于白天,日最高叶温和日最低叶温 均出现在高层,高层日温差波动幅度大于低层。

参考文献

- 1 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
- micrometerological variables within a maize canopy [J]. Acta Ecological Sinica,2005,25(7):1626 1634. (in Chinese)
- 2 刘云鹏,申思,潘余强,等.干旱胁迫下玉米叶-气温差与叶温差日变化特征及其品种差异[J].中国农业大学学报,2014, 19(5):13-21.
- LIU Yunpeng, SHEN Si, PAN Yuqiang, et al. Diurnal variation in leaf-air temperature difference and leaf temperature difference and the hybrid difference in maize under different drought stress[J]. Journal of China Agricultural University, 2014,19(5):13 21. (in Chinese)
- 3 郭兰,王子君,刘贺梅,等.小麦晚霜冻害形成机制与预警防御系统研究[J].农业灾害研究,2014,4(7):41-42. GUO Lan, WANG Zijun, LIU Hemei, et al. Formation mechanism of wheat late-frost damage and early-warning and resistance
 - system [J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2014, 4(7); 41 42. (in Chinese)
- 4 李茂松,王道龙,钟秀丽,等. 冬小麦霜冻害研究现状与展望[J].自然灾害学报,2005,14(4):72-78. LI Maosong, WANG Daolong, ZHONG Xiuli, et al. Current situation and prospect of research on frost of winter wheat[J]. Journal of Natural Disasters,2005,14(4):72-78. (in Chinese)
- 5 刘平湘,郭天财,韩巧霞,等.不同类型冬小麦品种拔节后幼穗低温敏感期的鉴定[J].现代农业科技,2011(11):41-43.
- LIU Pingxiang, GUO Tiancai, HAN Qiaoxia, et al. Identification of young ear's low temperature sensitive phase after jointing stage of different type winter wheat [J]. Modern Agriculture Science, 2011(11):41-43. (in Chinese)
- 6 JOHN B W, FLERCHINGER G N, PAUL R B, et al. Process-based modeling of temperature andwater profiles in the seedling recruitment zone: Part I. model validation[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 188(9): 89-103.
- 7 LIANG Wei, TIMOTHY E L, ANDREW T H, et al. Simulated water budget of a small forested watershed in the continental/ maritime hydroclimatic region of the United States [J]. Hydrol. Process, 2016, 30(13):2000 - 2013.
- 8 刘峻明,汪念,王鹏新,等. 基于 SHAW 模型的冬小麦近地面层气温模拟[J]. 农业机械学报,2015,46(增刊):274-282. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2015S044&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/ j.issn.1000-1298.2015.S0.044.

LIU Junming, WANG Nian, WANG Pengxin, et al. Simulation of air temperature within winter wheat near-ground layer based on SHAW model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 274-282. (in Chinese)

- 9 FLERCHINGERG N, SAXTON K E. Simultaneous heat and watermodel of freezing snow-residue-soil system I. theory and development[J]. Transaction of the ASAE, 1989, 32(2): 565 571.
- 10 FLERCHINGERG N, SAXTON K E. Simultaneous heat and water model of freezing snow-residue-soil system II : field verification [J]. Transaction of the ASAE, 1989,32(2): 573 - 578.
- 11 YU Q, FLERCHINGER G N, KOZAK J, et al. Energy balance simulation of wheat canopy using the RZ SHAW((RZWQM SHAW) model[J]. Transaction of the ASAE,2007,50(5):1507 1516.
- 12 YIN Zhifang, OUYANG Hua, XU Xingliang, et al. Estimation of evapotranspiration from faber fir forest ecosystem in the Eastern Tibetan Plateau of China using SHAW model[J]. Journal of Water Resource and Protection, 2010, 2(2): 143-153.
- 13 LI Ruiping, SHI Haibin, FLERCHINGER G N, et al. Modeling the effect of antecedent soil water storage on waterand heat status in seasonally freezing and thawing agricultural soils [J]. Geoderma, 2013, 206(9): 70 74.
- 14 郭东林,杨梅学. SHAW 模式对青藏高原中部季节冻土区土壤温、湿度的模拟[J].高原气象,2010,29(6):1369-1377. GUO Donglin,YANG Meixue. Simulation of soil temperature and moisture in seasonally frozen ground of Central Tibetan Plateau by SHAW Model[J]. Plateau Meteorology, 2010, 29(6):1369-1377. (in Chinese)
- 15 LI Yan, ZHOU Jian, KINZELBACH Wolfgang, 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 rrigated maize ecosystem [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013,176(13):10-24.
- 16 FANG Q X, MA L, FLERCHINGER G N, et al. Modeling evapotranspiration and energy balance in a wheat-maizecropping system using the revised RZ SHAW model[J]. Agricultural and Forest Eteorology, 2014, 194(194):218 229.
- 17 CAMPBELL G S. Soil physics with BASIC: transport models for soil-plant systems [M]. Amsterdam: Elsevier, 1985.
- 18 YU Qiang, FLERCHINGER G N. Extending the simultaneous heat and water (SHAW) model to simulate carbondioxide and water fluxes over wheat canopy [M] // AHUJA L R, REDDY V R, SASEENDRANS A, et al. Response of crops to limited water: understanding and modeling water stress effects on plant growth processes. CompleteBook. ASA, CSSSA and SSSA, Madison, Wisconsin, 2008; 191 214.
- 19 刘峻明,汪念,王鹏新,等. SHAW 模型在冬小麦晚霜冻害监测中的适用性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016,47(6): 265-274.http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160635&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.035.

LIU Junning, WANG Nian, WANG Pengxin, et al. Applicability of simultaneous heat and water model for monitoring late frost injury of winter wheat [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47 (6): 265 - 274. (in Chinese)

- 20 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.
- 21 郭仁卿,梁陟光,杨秀琴. 葡萄叶温的研究[J]. 河北农业技术师范学院学报,1990,4(2):39-42. GUO Renqing, LIANG Zhiguang, YANG Xiuqin. Study on the surface temperature of grape leaf [J]. Journal of Hebei Agrotechnical Teachers College, 1990,4(2):39-42. (in Chinese)
- 22 孙景生.夏玉米叶片气孔阻力与冠层阻力估算模型的研究[J].灌溉排水,1996,15(3):16-20. SUN Jingsheng. Studies on the estimating models of leaf stomatal resistance and canopy resistance for summer corn[J]. Guangai Paishui, 1996,15(3):16-20. (in Chinese)
- 23 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]. Agric Forest Meteor, 2003, 115(1): 51 69.