

基于 WOFOST – SHAW 耦合模型的冬小麦冠层气温模拟

王鹏新^{1,2} 刘丽娜^{1,2} 刘峻明^{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: 以河南省商丘地区为研究区域,在田间实验的基础上,对 WOFOST 模型和 SHAW 模型进行本地化标定,利用 WOFOST – SHAW 模型模拟 2016 年冬小麦拔节期-成熟期冠层 0 ~ 80 cm 高度每小时气温的变化特征,并将其模拟结果与实测数据进行对比。结果表明,利用 WOFOST – SHAW 模型模拟的冬小麦冠层,除了 80 cm 高度,气温的模型效率均大于 0.90,超过 75% 的模拟气温的绝对误差在 -1.5 ~ 2.5℃ 之间,说明冠层气温的整体模拟精度较高。WOFOST – SHAW 模型对冬小麦冠层各高度的日最低气温的模型效率平均值为 0.86,日最低气温模拟值偏高 0.53℃,说明冠层日最低气温的模拟值与实测值吻合度较高。同时冬小麦易受冻高度层模拟气温能准确地反映 0℃ 以下的冠层日最低气温,因此,WOFOST – SHAW 模型可以很好地模拟冠层气温,提升 SHAW 模型的适用性,可为冬小麦晚霜冻害的监测提供参考依据。

关键词: 冬小麦; 冠层; 温度模拟; WOFOST 模型; SHAW 模型

中图分类号: S162.4⁺2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)01-0164-09

Simulation of Air Temperature within Winter Wheat Canopy by
Coupling WOFOST and SHAW Models

WANG Pengxin^{1,2} LIU Li'na^{1,2} LIU Junming^{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: Air temperature within canopy reflects the growing condition of plants objectively. Simulation of air temperature within canopy can assist in better understanding of microclimate dynamic change characteristics, and can also provide a scientific basis for monitoring late frost injury of winter wheat. A field experiment was conducted in Shangqiu City, Henan Province to observe the winter wheat growth and ambient environmental factors. Based on the localization, coupled WOFOST and SHAW models were applied to simulate dynamic characteristics of air temperature hourly within winter wheat canopy from 0 cm to 80 cm at after-jointing stage in 2016, and the simulation results were compared with measured data. The results suggested that for coupled WOFOST and SHAW models, model efficiency of the simulated and measured values at different heights within winter wheat canopy was greater than 0.90, and over 75% of absolute errors of simulated values were in the range of -1.5 ~ 2.5℃, showing a high accuracy in simulating air temperature within winter wheat canopy as a whole. For daily lowest values of air temperature within winter wheat canopy, model efficiency of coupled WOFOST and SHAW models was about 0.86, and the simulation values of daily lowest values of air temperature within winter wheat canopy were 0.53℃ greater than measured values, showing an excellent conformity between simulated and measured values. And the simulation values could precisely reflect daily lowest values of air temperature below 0℃ within winter wheat canopy where the late frost injury occurred easily. Therefore, coupled WOFOST and SHAW models can simulate air temperature within winter wheat canopy well, increase applicability of SHAW model, and provide a reference for monitoring late frost injury.

Key words: winter wheat; crop canopy; temperature simulation; WOFOST model; SHAW model

0 引言

冠层气温是作物冠层内空气本身的温度,属于农田小气候中气象因素,反映农作物的生长环境,对作物生长发育、产量、冻害和病虫害的发生有重要影响^[1]。晚霜冻害是一种突发性的低温农业气象灾害,一般发生于冬小麦拔节后,常采用气温指标法、高光谱分析法等进行监测^[2-3]。冠层气温与发生冻害时作物的生长状况紧密联系,但由于受太阳辐射、湍流交换、风速等影响而频繁变化,了解其动态变化具有一定难度。一种相对可行的解决方法是通过综合考虑农田作物生态系统和水热运移过程之间相互作用的数值模型实现对作物生长过程和农田小气候要素的模拟。

FLERCHINGER 等^[4]建立的 SHAW 模型,在 1991 年加入了蒸腾作用和作物冠层,模拟了土壤-植被-大气系统中能量流动和物质循环过程,在气象、水文、水土保持等方面得到诸多应用^[5-6]。此外,SHAW 模型也被用于对玉米、小麦等农作物冠层内的小气候要素进行模拟,并获得了较好效果^[7-8]。刘峻明等^[9]利用 SHAW 模型模拟冬小麦拔节期后近地面层不同高度的每小时气温变化特征,验证了模型对麦田气温模拟的有效性,并认为该模型在遭受晚霜冻时可以准确地模拟麦田温度廓线。SHAW 模型是一个分层系统,其运行依赖于能准确描述垂直方向植株结构的参数。对农作物而言,这些参数主要包括株高、叶宽、叶面积指数(LAI)、地上干生物量等,但这些参数较难获取,通常采用定期采样的方式获得,因而限制了 SHAW 模型的大范围应用。作物生长模型是一种面向过程、机理性的动态模型,它根据气象、土壤、作物品种、作物种植因素,模拟作物生长、发育过程和产量,其优势主要体现在,以日为时间步长动态地模拟作物生长发育过程,能定量地描述作物的基本生理生态过程和植株结构相关参数。目前已经建立的作物生长模型多达百种,其中 WOFOST 模型可以通过改变作物参数而用于不同作物种类或品种,其普适性已经得到了肯定^[10],广泛用于作物估产、确定生长关键因子、物候监测等方面^[11-13]。

本文耦合 WOFOST 模型和 SHAW 模型,利用 WOFOST 模型模拟冬小麦生长过程,以其输出结果中的若干生物指标作为反映冬小麦结构的直接或间接参数,并将这些结构参数作为 SHAW 模型的输入,对农田小气候环境要素廓线进行模拟,以解决 SHAW 模型植株结构参数获取困难的问题,以期为晚霜冻害监测指标提供参考依据。

1 实验与方法

1.1 研究区域概况

研究区商丘市位于河南省最东部,地理位置为 114°49' ~ 116°39' E, 33°43' ~ 34°52' N,地处黄河冲积平原东南部,属于淮河流域。商丘市属暖温带季风气候,四季分明,年均温在 13 ~ 15℃,年降水量在 650 ~ 780 mm,年日照时数 2 205 ~ 2 428 h,年均蒸发量 1 461 mm,无霜期 221 d^[8]。商丘市土壤类型为潮土,呈中性至弱酸性。冬小麦播种时间一般为 10 月上中旬,12 月中旬进入越冬期,次年 2 月下旬进入返青期,拔节期在 3 月中下旬,4 月中下旬抽穗开花,5 月底或 6 月初小麦成熟收割。

1.2 田间实验与数据采集

在河南省商丘市农林科学研究所双八实验站进行田间实验,位于北纬 34°31'55",东经 115°42'37",海拔高度 50.1 m。实验田冬小麦品种为“豫麦 18 号”,播种期为 2015 年 10 月 20 日,次年 3 月 8 日进入拔节期。2016 年 3 月 12 日—5 月 29 日在实验田中设置 2 个样点进行定位观测。

(1)冬小麦冠层各高度空气温度的观测。在实验田土壤表面上方不同高度安装空气温度传感器,高度分别为 5、10、20、30、40、50、60、70、80 cm,每隔 1 h 观测 1 次气温。

(2)上垫面气象数据的观测。在实验田土壤表面上方 2 m 高度处安装传感器,每隔 1 h 观测 1 次空气温度、空气相对湿度、风速、太阳辐射强度和降水量。取 1 d 内空气温度观测值中的最大值和最小值分别作为日最高气温和日最低气温,取 1 d 内风速测量值的平均值作为日平均风速,取 1 d 内太阳辐射量的累计值作为日太阳辐射量,取前一日 20 点至当日 20 点之间降水量的累计值作为当日降水量,取每日 08:00 空气相对湿度与饱和水汽压的乘积作为每日 08:00 水汽压。另外,2015 年冬小麦播种期至 2016 年田间观测之前的时间段内的每日气象数据均由商丘市气象站提供。

(3)土壤温湿度的观测。在土壤不同深度处理藏土壤温度和土壤水分传感器,深度分别为 0、5、10、20、30、40 cm,每隔 1 h 观测 1 次土壤温度和湿度。

(4)取样观测。在观测时段内,每隔 4 d 对株高、叶宽、生长锥或幼穗所在高度、叶面积指数(LAI)、地上各部分的干生物量进行测定。在拔节期和孕穗期,测量植株基部到最上部展开叶的叶尖或者抽穗的距离记为株高;在抽穗期到成熟期过程中,测量从植株基部到穗顶(不包括芒)的距离记为

株高。叶宽为叶片中最宽距离,测量主茎所有叶片的叶宽并计算平均值记为植株的叶宽。

(5)冬小麦生育期的调查界定。田间观察确定实验田中冬小麦进入关键物候期(拔节-抽穗-开花-灌浆-成熟)的时间。

1.3 WOFOST 模型本地化标定

WOFOST 模型根据气象和土壤条件,以作物生理生态过程为基础对一年生作物的根、叶、茎、穗生物量及土壤水分动态进行模拟^[14]。其模拟过程主要通过气候、作物、土壤 3 个模块协同完成,其根据需要在潜力模式、水分限制模式、养分限制模式

等 3 种模式下模拟作物生长过程。研究使用实验田观测或者商丘市气象站提供的降水资料作为输入,不考虑灌溉,开展水分限制模式的冬小麦生长模拟。

为使 WOFOST 模型准确模拟冬小麦的生长发育过程,需要对模型参数进行标定。研究中对冬小麦的关键生长参数和土壤参数进行调整。对关键生长参数,先通过查阅文献、WOFOST 模型推荐、实验测定等方式确定可能取值范围,再运用 FSEOPT 优化程序结合田间实测值确定最终参数值^[14-16]。土壤参数主要实测了田间持水量、凋萎系数、饱和含水率等。主要参数见表 1。

表 1 WOFOST 模型主要生长参数
Tab.1 Main growth parameters of WOFOST

参数	含义	数值	来源
TBASEM	出苗最低温度/℃	2	文献[14]
TEFFMX	出苗最高有效温度/℃	30	文献[15]
TSUMEM	播种到出苗的积温/(℃·d ⁻¹)	98.3	实测计算
TSUM1	出苗到开花的积温/(℃·d ⁻¹)	1 026.3	实测计算
TSUM2	开花到成熟的积温/(℃·d ⁻¹)	741.2	实测计算
LAIEM	出苗时叶面积指数/(hm ² ·hm ⁻²)	0.131	文献[16]
RGRLAI	叶面积指数最大日增量/(hm ² ·hm ⁻² ·d ⁻¹)	0.008 17	WOFOST
SPAN	温度达到 35℃后的叶片寿命/d	25.0	FSEOPT
KDIFTB	漫射光的消散系数	0.6	WOFOST
CVL	干物质转化成叶片的效率/(kg·kg ⁻¹)	0.740	实测计算
CVO	干物质转化成贮存器官的效率/(kg·kg ⁻¹)	0.830	实测计算
CVR	干物质转化成根的效率/(kg·kg ⁻¹)	0.740	实测计算
CVS	干物质转化成茎的效率/(kg·kg ⁻¹)	0.740	实测计算
Q10	温度变化 10℃时呼吸作用变化的速率	2	WOFOST
RML	叶的维持呼吸作用速率/(kg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.03	WOFOST
RMO	贮存器官的维持呼吸作用速率/(kg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.01	WOFOST
RMR	根的维持呼吸作用速率/(kg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.015	WOFOST
RMS	茎的维持呼吸作用速率/(kg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.015	WOFOST

注:各器官的维持呼吸作用速率以 CH₂O 计。

1.4 SHAW 模型描述与本地化标定

SHAW 模型用于模拟从植物冠层、雪被、枯落物、地表到土壤一定深度的一维垂直廓线^[17-19]。模型对大气-植物-土壤系统中物质能量传输过程有着清晰的数学表达,综合考虑冠层、雪、枯落物和土壤中的热、水、溶质通量而得到一个同步解作为系统的解^[20-21]。该系统在垂直方向进行分层,系统中能量和水分输入分别由上边界的气象条件和下边界土壤条件决定。

SHAW 模型的作物层基于能量平衡方程计算水分的吸收和蒸发,基于 K 理论求解层内温湿度廓线。假定叶片热容量可忽略,作物层每个节点需满足以下的叶能量平衡方程

$$R_n + H_l + L_v E_l = 0 \tag{1}$$

其中
$$H_l = -\rho_a c_a L_{AI} \frac{T_l - T_a}{r_h} \tag{2}$$

$$E_l = L_{AI} \frac{\rho_{vs} - \rho_{va}}{r_s + r_v} \tag{3}$$

式中 R_n ——作物层吸收的全波段净辐射,W/m²
 H_l ——作物层间从叶片传输到空气热量,W/m²
 E_l ——作物层间水汽通量,kg/(m²·s)
 L_{AI} ——叶面积指数
 ρ_a ——空气密度,kg/m³
 c_a ——空气比热容,J/(kg·K)
 T_a 、 T_l ——气温、叶温,℃
 ρ_{va} 、 ρ_{vs} ——空气的水汽密度、叶片气孔腔内水汽密度,kg/m³
 L_v ——蒸发潜热,J/kg

$r_h、r_v、r_s$ ——热量传输阻力、水汽传输阻力、气孔阻力,s/m

模型中植物生物物理特征参数、土壤理化参数和水力特性参数主要来自文献[8-9]或者基于实测数据计算获得。具体参数见表 2。

表 2 SHAW 模型站点主要特征参数

Tab.2 Main characteristic parameters of SHAW at experimental site			
参数	含义	数值	来源
XANGLE	叶向系数	0.96	文献[8-9]
CANALB	植物反照率	0.2	
TCCRIT	植物蒸腾的最低温度/℃	7	
RSTOMO	无水分胁迫下的气孔阻力/(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	
SAD	砂粒含量/%	30.3	
SILT	粉粒含量/%	40.5	
CLAY	粘粒含量/%	29.2	田间实测
OM	有机质含量/%	0.5	
ρ_b	平均容重/(kg·m ⁻³)	1 420	
θ_s	饱和含水率/(m ³ ·m ⁻³)	0.49	
K_s	饱和导水率/(cm·h ⁻¹)	0.298	
ψ_e	空气进入势/m	-0.1	
b	空隙大小分布指数	3	

注:临界叶水势(PLEAFO)指气孔阻力为最小值的 2 倍时的叶水势。 K_s 、 ψ_e 和 b 通过 Campbell 提出的利用土壤结构、容重、颗粒组成等建立的经验方程计算获得。

1.5 WOFOST 模型与 SHAW 模型的耦合

WOFOST 模型以日为时间步长运行,输入每日气象数据(气温、风速、太阳辐射、水汽压和降水等)模拟冬小麦生长过程,获得每日各器官干物质积累量、LAI 等数据,并将这些数据作为 SHAW 模型的输入参数。SHAW 模型所需要的株高与叶宽数据无法直接通过 WOFOST 模型获得,本研究分别基于单位面积的茎干质量与 LAI 建立转换模型来获得。

冬小麦拔节之后茎秆伸长,茎秆壁增厚且直径变粗,从而株高和茎粗不断增大,而抽穗开花之后设定株高保持不变。在此过程中冬小麦的单位面积茎干质量也不断增大。应用 2016 年冬小麦拔节期-开花期实测的 H (株高,m)和 W_{st} (单位面积茎干质量,kg/m²),构建的两者间的回归方程为

$H=0.8679W_{st}^{0.4037} \quad (R^2=0.97,P<0.001) \quad (4)$

方程达到极显著水平。应用此方程将 WOFOST

模型输出的单位面积茎干质量数据转换为株高,并作为 SHAW 的输入。

在拔节期和孕穗期,冬小麦叶宽、叶长和 LAI 均不断增大。抽穗期叶宽继续增大,而 LAI 逐渐增至最大值后减小。抽穗期之后叶宽基本保持不变。将在 2016 年冬小麦拔节期-抽穗期实测 LAI 与 w (叶宽,cm)建立相关方程为

$$L_{AI}=-24.625w^2+77.073w-53.783$$
$$(R^2=0.92,P<0.001) \quad (5)$$

方程达到极显著水平。应用此方程将 WOFOST 模型输出的 LAI 数据转换为叶宽,并作为在拔节-抽穗期间 SHAW 的输入。

将以上各参数值、实验田上垫面的实测气象数据和土壤温湿度数据等输入 SHAW 模型,驱动 SHAW 模型运行。SHAW 模型以小时为时间步长,输出冠层垂直方向各高度层间的能量、水分和溶质通量以及描述作物冠层小气候环境的冠层空气温度等数据。

1.6 模拟结果的精度评价指标

1.6.1 模型效率

模型效率(Model efficiency,ME)用于表达气温整体模拟效果。ME 的值越接近 1 时,表明模拟效果越好。ME 的计算公式为

$$M_E=1-\frac{\sum_{i=1}^n(T_{a_i}-T_{a_i}^{obs})^2}{\sum_{i=1}^n(T_{a_i}^{obs}-\overline{T_a^{obs}})^2} \quad (6)$$

式中 $T_{a_i}^{obs}$ ——第 i 时刻气温的观测值
 T_{a_i} ——第 i 时刻气温的模拟值
 $\overline{T_a^{obs}}$ ——气温的观测平均值
 n ——观测样本数

1.6.2 均方根误差

均方根误差(Root mean square error, RMSE)用来反映气温模拟值与实测值之间的总体差异。RMSE 越接近于 0,说明模拟误差越小,精度越高。RMSE 的计算公式为

$$R_{MSE}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n(T_{a_i}-T_{a_i}^{obs})^2} \quad (7)$$

1.6.3 平均偏差

平均偏差(Mean bias error, MBE)用来反映气温模拟值与实测值之间的平均偏差,负值表示气温被低估,正值表示气温被高估。MBE 越接近于 0,说明模拟精度越高。MBE 的计算公式为

$$M_{BE}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n(T_{a_i}-T_{a_i}^{obs}) \quad (8)$$

2 结果与分析

2.1 冬小麦冠层各高度的气温模拟

利用 WOFOST - SHAW 模型对实验田冬小麦 2016 年 3 月 12 日(拔节期)—5 月 29 日(成熟期)(儒略日 72 - 150)冬小麦冠层 5、10、20、30、40、50、60、70、80 cm 高度的每小时气温进行模拟,并通过气温实测值验证模型的模拟结果(图 1)。可以看出,冠层各高度气温模拟值与实测值均集中分布在 1:1 线附近,两者具有显著的线性相关关系,各高度层的 R^2 均不小于 0.93 ($P < 0.001$),表明 WOFOST - SHAW 模型的气温模拟值和实测值较一致。分析图 1 中气温模拟值和实测值的统计指标,发现在除 80 cm 的高度上,WOFOST - SHAW 模型的 ME 均大于 0.90, RMSE 均在 1.41 ~ 2.11℃ 之间。在 5 ~ 40 cm 高度上,WOFOST - SHAW 模型的 MBE 值均为正值,模拟值偏大 0.51 ~ 0.93℃。在 50 ~ 80 cm 高度上,WOFOST - SHAW 模型的 MBE 值均为负值,模拟值偏小 0.21 ~ 1.38℃。这些结果表明,WOFOST -

SHAW 模型的模拟误差在合理误差范围内,整体模拟精度较高。另外,冠层上部(60 ~ 80 cm 高度)和冠层下部(5 ~ 20 cm 高度)的 ME 分别介于 0.85 ~ 0.94、0.91 ~ 0.93 之间,而冠层中部(30 ~ 50 cm 高度)ME 为 0.95,冠层中部的 ME 值高于冠层上部和冠层下部;冠层上部、中部、下部的 RMSE 分别介于 1.77 ~ 3.09℃、1.41 ~ 1.53℃、1.86 ~ 1.89℃ 之间,MBE 分别介于 - 1.38 ~ - 0.21℃、- 0.25 ~ 0.55℃、0.78 ~ 0.93℃ 之间,表明冠层中部的模拟误差最小,模拟效果优于冠层上部和冠层下部。

为进一步进行模拟结果的精度评价,计算 WOFOST - SHAW 模型对冬小麦冠层各高度气温模拟值与实测值的差值的频率分布(图 2)。可看出,各高度模拟结果绝对误差频率分布图形状相似,各高度绝对误差分布宽度基本一致,均在 $[- 9.5, 7.5]$ ℃ 范围内,绝对误差频率分布直方图峰值基本上均落在 $[- 0.5, 0.5]$ ℃ 之间。在 $[- 9.5, - 0.5]$ ℃ 误差范围内的冬小麦冠层上部的频率高于冠层下

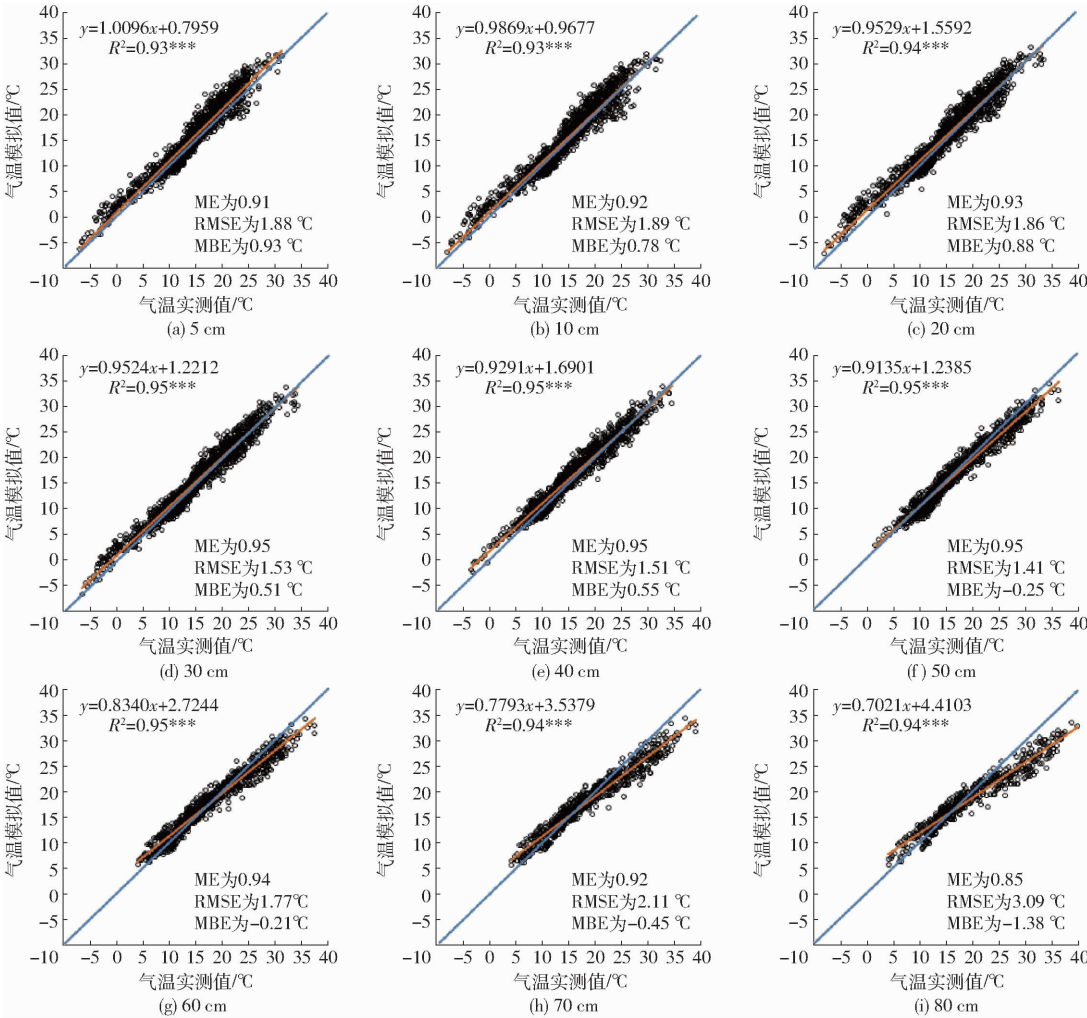


图 1 冬小麦不同高度层气温模拟值和实测值对比(2016 年 3 月 12 日—5 月 29 日)(***表示 0.001 显著水平)

Fig. 1 Comparisons of simulated and measured air temperatures at different heights within winter wheat canopy from March 12 to May 29, 2016

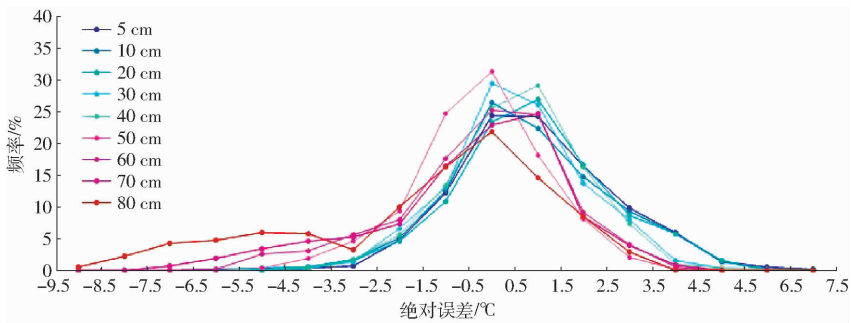


图 2 冬小麦冠层不同高度气温模拟值的绝对误差频率分布

Fig. 2 Frequency distribution of absolute errors of simulated air temperature at different heights within winter wheat canopy

部,而在 $[0.5, 7.5]$ ℃误差范围内,则结果相反,说明冠层上部模拟值整体偏低,冠层下部模拟值整体偏高,这与之前所述的不同高度 MBE 值反映的模拟偏差的结果一致。WOFOST - SHAW 模型在冠层各高度的气温模拟误差主要集中分布于 $[-1.5, 2.5]$ ℃之间,在 $[-1.5, -0.5]$ ℃、 $[-0.5, 0.5]$ ℃、 $[0.5, 1.5]$ ℃和 $[1.5, 2.5]$ ℃范围内的比例分别为 15%、26%、23%、12% 左右。说明超过 75% 的气温模拟值误差在 $[-1.5, 2.5]$ ℃范围内,WOFOST - SHAW 模型在冬小麦冠层各高度的气温模拟值精度较好。

2.2 冠层日最低气温的模拟

冬小麦在拔节到抽穗期间遇到 0℃ 以下低温时易造成晚霜冻害,日最低气温常作为霜冻害监测指标^[22]。相对于气象站 1.5 m 百叶箱内气温,冠层不同高度的气温能更真实地反映冬小麦生长环境,因此分析 WOFOST - SHAW 模型对冬小麦冠层不同高度日最低气温的模拟情况有利于了解霜冻害发生的冬小麦当冠层低温环境。在冬小麦当冠层各高度分别取

1 d 内气温模拟值和实测值的最小值作为冠层日最低气温的模拟值与实测值,并进行对比(图 3,由于实验田断电,儒略日 84、85、124、146、147 的气象数据等采集不完整,造成 SHAW 模型在当天无法正常运行模拟,从而模拟值和实测值均缺失)。可以发现,在观测时间段内冠层各高度日最低气温的模拟值与实测值基本一致。模型对 3 月 14 日、3 月 27 日、4 月 4 日、4 月 29 日、5 月 16 日(儒略日 74、87、95、120、137)出现的日最低气温极小值和 3 月 17 日、4 月 2 日、4 月 22 日、5 月 5 日、5 月 22 日(儒略日 77、93、113、126、143)出现的极大值都较好地体现了,说明模拟值能较好地体现出冬小麦当冠层日最低气温的波动。整体看冠层各高度日最低气温的模拟值与实测值拟合度较高,且能反映实测值的变化趋势。

为进行冠层日最低气温模拟结果的精度评价,计算其模拟值和实测值的各个统计指标(表 3)。可以看出,模型在冠层各高度层日最低气温的 ME 平均值为 0.86, RMSE 和 MBE 的平均值分别为 1.44℃、

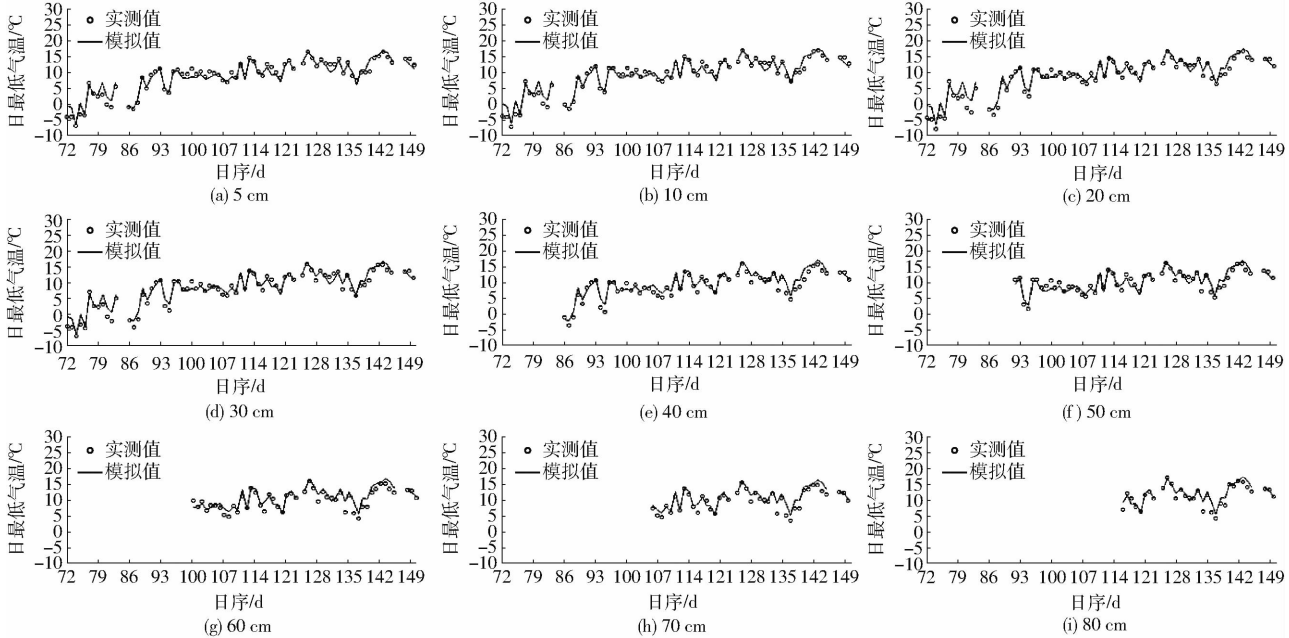


图 3 冬小麦不同高度日最低气温模拟值与实测值对比

Fig. 3 Comparisons of simulated and measured daily minimum air temperatures at different heights within winter wheat canopy

表 3 冬小麦冠层不同高度日最低气温模拟结果
统计分析
Tab.3 Statistical analysis of simulated daily minimum air
temperature at different heights within winter wheat canopy

高度/cm	ME	RMSE/℃	MBE/℃
5	0.94	1.35	-0.01
10	0.94	1.41	0.16
20	0.92	1.64	0.71
30	0.93	1.45	0.55
40	0.86	1.43	0.80
50	0.83	1.26	0.12
60	0.74	1.49	0.77
70	0.77	1.51	0.96
80	0.79	1.46	0.71
均值	0.86	1.44	0.53

0.53℃,表明模型对冠层日最低气温整体模拟效果比较合理。WOFOST-SHAW 模型在 5、10、20、30 cm 高度的 ME 均不小于 0.92,40、50 cm 高度的 ME 在 0.83~0.86 之间,而 60、70、80 cm 高度的 ME 下降至 0.74~0.79 之间,说明模型的 ME 随高度增加而下降;同时 RMSE 总体上随高度上升而增加,距离冠

层顶部越近,模拟误差越大;模型在各高度的 MBE 基本上均大于 0,各层模拟值稍高于实测值。总之,WOFOST-SHAW 模型可以较好地模拟冠层日最低气温,存在随冠层高度增加模拟精度下降、日最低气温模拟值偏高的问题。

进一步分析 WOFOST-SHAW 模型对零下冠层日最低气温的模拟效果。在 3 月 12 日—3 月 16 日、3 月 27 日(处于拔节期)在实验田上方 2 m 高度处均观测到 0℃ 以下气温,而在 3 月 12 日—27 日时间段内对低温敏感的冬小麦生长锥的所在高度由 3 cm 增至 9 cm。分别以 5 cm 和 10 cm 高度为例,分析 WOFOST-SHAW 模型在低温天气出现时冬小麦易受冻高度层的气温模拟效果(图 4),发现在 3 月 12 日—3 月 16 日、3 月 27 日这 6 天模型的整体气温模拟值与实测值比较接近,且变化趋势一致。在 3 月 14 日、16 日和 27 日模型对 0℃ 以下冠层日最低气温的模拟值与实测值基本一致,而 3 月 12 日、13 日和 15 日模型对日最低气温的模拟值高于实测值,但仍然可以反映冬小麦生长锥所在位置低于 0℃ 的环境气温。

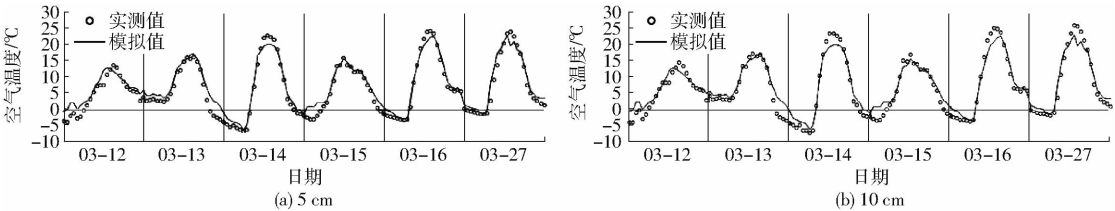


图 4 冬小麦冠层 5 cm 和 10 cm 高度气温模拟值与实测值对比

Fig.4 Comparisons of simulated and measured air temperatures at 5 cm and 10 cm height within winter wheat canopy

3 讨论

SHAW 模型为分层结构,可以获得垂直方向的温度分布,因此植株结构参数对于 SHAW 模型有重要影响;而由于作物在不断生长,所以植株结构参数处于动态变化中,而传统的田间采样方式存在周期长、破坏性大、费时费力的缺点,这成为 SHAW 模型的限制因素。WOFOST 模型的优势在于为 SHAW 模型提供动态的作物生长信息,基于这些信息转换为植株结构参数,使得 SHAW 模型可以获得动态的植株结构信息。WOFOST-SHAW 模型在冬小麦拔节之后对冠层各高度层气温的整体模拟效果较好,表明在无实测生物量数据的情况下,WOFOST-SHAW 模型可以合理模拟田间冠层气温整体动态变化。传统人工采样方式获取的生物量将某一次采样值代表某一时段,周期长,破坏性大、且费时费力。而 WOFOST 模型能较合理地模拟每日冬小麦的生物量变化,它提供动态植株结构参数后,使 SHAW

模型适应性增强。同时,WOFOST 模型本身的也具有局限性。在水分限制生长模式下,它仅考虑水分而假设养分、病虫害和耕作措施等其他条件均处于最优状况,致使开花期之后 WOFOST 模型模拟生物量的偏差大于拔节期和抽穗期。这可能导致 WOFOST-SHAW 模型在冬小麦生长后期气温模拟值偏差变大,出现整体看冠层上部与冠层下部各高度层误差变化趋势不一致的现象。虽然 WOFOST-SHAW 模型在冠层各高度模拟效果存在一定差异,但整体看 WOFOST-SHAW 模型的模拟结果与实测值拟合度高,解决了 SHAW 模型参数获取困难的问题。

WOFOST-SHAW 模型可以较好地模拟冠层日最低气温,可以为冬小麦晚霜冻害监测提供比较准确的监测指标。同时随冠层高度增加模型模拟精度下降,这与前人研究结果一致^[5]。从极端低温的模拟情况来看,WOFOST-SHAW 模型可以模拟冬小麦低温敏感生育期内易受冻高度层的低于 0℃ 的

低温环境,并合理模拟零下日最低气温,同时模型存在低温模拟值偏高的问题,模拟精度有待进一步提高。

4 结论

(1)提出了一种通过 WOFOST 模型直接或间接获取 SHAW 模型运行所需的生物指标的方法,该方法不仅避免了传统采样方式费时费力的不足,有效地解决了 SHAW 模型植株结构参数获取困难的问题,而且可以获取连续变化的生物量参数,提高了 SHAW 模型的适用性。

(2)WOFOST – SHAW 模型对冬小麦冠层各高

度气温模拟值与实测值的 R^2 均不小于 0.93,ME 基本上均大于 0.90,表明模型能较好地模拟冠层气温,整体模拟精度比较高;除 80 cm 高度外,各高度层的 RMSE 均在 1.41 ~ 2.11℃ 之间,超过 75% 的气温模拟误差在 -1.5 ~ 2.5℃ 范围内,表明冠层各高度层模拟误差在合理误差范围内。

(3)WOFOST – SHAW 模型对冠层日最低气温的模拟时,ME 平均值为 0.86, RMSE 与 MBE 的平均值分别为 1.44℃、0.53℃,说明模型对冠层日最低气温的拟合度较高。同时,模型在冬小麦易受冻高度层比较准确地反映低于 0℃ 的低温环境和日最低气温。

参 考 文 献

- 刘云, 宇振荣, 孙丹峰. 冬小麦冠气温差及其相关影响因素关系研究[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(1): 30 – 35.
LIU Yun, YU Zhenrong, SUN Danfeng. Difference of canopy-air temperature and its affecting factors[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(1): 30 – 35. (in Chinese)
- 杨邦杰, 王茂新, 裴志远. 冬小麦冻害遥感监测[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 136 – 140.
YANG Bangjie, WANG Maoxin, PEI Zhiyuan. Monitoring freeze injury to winter wheat using remote sensing[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(2): 136 – 140. (in Chinese)
- 王慧芳, 王纪华, 董莹莹, 等. 冬小麦冻害胁迫高光谱分析与冻害严重度反演[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(5): 1357 – 1361.
WANG Huifang, WANG Jihua, DONG Yingying, et al. Monitoring freeze stress levels on winter wheat from hyperspectral reflectance data using principal component analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(5): 1357 – 1361. (in Chinese)
- FLERCHINGER G N, PIERSON F B. Modelling plant canopy effects on variability of soil temperature and water: model calibration and validation[J]. Journal of Arid Environments, 1997, 35(4): 641 – 653.
- LI R, SHI H, FLERCHINGER G N, et al. Modeling the effect of antecedent soil water storage on water and heat status in seasonally freezing and thawing agricultural soils[J]. Geoderma, 2013, 206(9): 70 – 74.
- ZHANG Y, CHENG G, XIN L, et al. Coupling of a simultaneous heat and water model with a distributed hydrological model and evaluation of the combined model in a cold region watershed[J]. Hydrological Processes, 2013, 27(25): 3762 – 3776.
- 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 simulating energy balance, leaf temperature and micrometeorological variables within a maize canopy[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(7): 1626 – 1634. (in Chinese)
- 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/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊): 274 – 282. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2015s044&flag=1. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 274 – 282. (in Chinese)
- 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?file_no=20160635&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.035.
LIU Junming, 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)
- 何亮, 侯英雨, 赵刚, 等. 基于全局敏感性分析和贝叶斯方法的 WOFOST 作物模型参数优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 169 – 179.
HE Liang, HOU Yingyu, ZHAO Gang, et al. Parameters optimization of WOFOST model by integration of global sensitivity analysis and Bayesian calibration method[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(2): 169 – 179. (in Chinese)
- 刘峻明, 李曼曼, 王鹏新, 等. 基于 LAI 时间序列重构数据的冬小麦物候监测[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 120 – 129.
LIU Junming, LI Manman, WANG Pengxin, et al. Monitoring of phenology by reconstructing LAI time series data for winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(19): 120 – 129. (in Chinese)

- 12 黄健熙, 李昕璐, 刘帝佑, 等. 顺序同化不同时空分辨率 LAI 的冬小麦估产对比研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 240 – 248. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150134&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.034.
HUANG Jianxi, LI Xinlu, LIU Diyou, et al. Comparison of winter wheat yield estimation by sequential assimilation of different spatio-temporal resolution remotely sensed LAI datasets[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 240 – 248. (in Chinese)
- 13 CHENG Z, MENG J, WANG Y. Improving spring maize yield estimation at field scale by assimilating time-series HJ – 1 CCD data into the WOFOST model using a new method with fast algorithms[J]. Remote Sensing, 2016, 8(4): 303.
- 14 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等. 基于 WOFOST 作物生长模型的冬小麦干旱影响评估技术[J]. 生态学报, 2013, 33(6): 1762 – 1769.
ZHANG Jianping, ZHAO Yanxia, WANG Chunyi, et al. Evaluation technology on drought disaster to yields of winter wheat based on WOFOST crop growth model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(6): 1762 – 1769. (in Chinese)
- 15 邬定荣, 欧阳竹, 赵小敏, 等. 作物生长模型 WOFOST 在华北平原的适用性研究[J]. 植物生态学报, 2003, 27(5): 594 – 602.
WU Dingrong, OUYANG Zhu, ZHAO Xiaomin, et al. The applicability research of WOFOST model in North China Plain[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2003, 27(5): 594 – 602. (in Chinese)
- 16 张雪芬, 余卫东, 王春乙. 基于作物模型灾损识别的黄淮区域冬小麦晚霜冻风险评估[J]. 高原气象, 2012, 31(1): 277 – 284.
ZHANG Xuefen, YU Weidong, WANG Chunyi. Risk evaluation for spring frost disaster of winter wheat in Yellow River-Huai River regions based on crop model[J]. Plateau Meteorology, 2012, 31(1): 277 – 284. (in Chinese)
- 17 FLERCHINGER G N, HANSO C L, WIGHT J R. Modeling evapotranspiration and surface energy budgets across a watershed[J]. Water Resources Research, 1996, 32(8): 2539 – 2548.
- 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(3): 218 – 229.
- 19 YU Q, FLERCHINGER G N, XU S, et al. Energy balance simulation of a wheat canopy using the RZ – SHAW (RZWQM – SHAW) model[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(5): 1507 – 1516.
- 20 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.
- 21 QI Z, MA L, BAUSCH W C, et al. Simulating maize production, water and surface energy balance, canopy temperature, and water stress under full and deficit irrigation[J]. Transactions of the ASABE, 2016, 59(2): 623 – 633.
- 22 钟秀丽, 王道龙, 赵鹏, 等. 黄淮麦区冬小麦拔节后霜冻温度出现规律研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(5): 17 – 20.
ZHONG Xiuli, WANG Daolong, ZHAO Peng, et al. Occurrence of frost temperature in Huanghuai wheat production zone after winter wheat elongation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(5): 17 – 20. (in Chinese)