doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.026

越冬期麦田根区水热耦合模型参数原位估算与检验

程强'徐嫱'陈超'薛绪掌'王忠义'孙宇瑞'

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院,北京 100083; 2. 北京农业智能装备技术研究中心,北京 100097)

摘要:越冬期根区充足的蓄水量有利于春季冬小麦的生长并有助于增产,而冬季作物根区水分运移规律通常借助 土壤冻融过程水热耦合模型来描述,但该模型的预测精度受参数确定方法与边界条件等多种因素的影响。为了提 高模型预测精度,提出了一种改进型的土壤冻融过程水热耦合模型参数估算方法,即运用土壤冻融特征曲线(冻土 未冻水含量和土壤温度的关系)来原位估算土壤水热耦合模型参数,并检验该方法的适用性。在此基础上,评价地 表蒸发量对模型预测精度的影响。大田试验在北京市昌平区小汤山精准农业示范基地开展,历经两个越冬期 (2011—2012 年和 2012—2013 年),利用管式介电传感器、温度传感器和蒸渗仪分别采集了土壤剖面未冻水含量、 土壤温度和地表蒸发量数据。利用第1个越冬期(2011—2012 年)的数据拟合土壤冻融特征曲线,对土壤水热参数 进行最优估算,利用第2个越冬期(2012—2013 年)的数据评价估算参数和地表蒸发量对模型预测精度的影响。结 果表明:利用估算参数的模型预测值整体上与实测值相符。考虑到地表蒸发量对模型水热上边界的影响,第2个 越冬期 10 cm 处未冻水含量与温度预测值和实测值的 RMSE 分别为 0.046 m³/m³和 1.883℃,20 cm 深度 RMSE 分 别为 0.071 m³/m³和 2.347℃。相比之下,在未考虑地表蒸发量影响下,第2个越冬期 10 cm 处未冻水含量与温度 的模拟值和实测值的 RMSE 为 0.059 m³/m³和 2.149℃,20 cm 深度 RMSE 为 0.081 m³/m³和 2.666℃。提出的改进 型模型参数估算方法能够保证模型的预测精度,且考虑地表蒸发量的影响能够进一步提高模型的预测精度,随着 深度的增加,蒸发量对水分与温度的影响逐渐减小。

关键词:麦田根区;水热耦合运移;地表蒸发量;数值模拟;参数估算

中图分类号: S271 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)08-0219-09

Validation and in-situ Parameter Estimation for Model of Water Transport and Energy Exchange in Root Zone of Winter Wheat in Winter

CHENG Qiang¹ XU Qiang¹ CHEN Chao¹ XUE Xuzhang² WANG Zhongyi¹ SUN Yurui¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
 2. Beijing Research Centre of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: Sufficient water storage in root zone during winter time not only benefits crop growth in next spring, but also potentially increases the yield. Water movement in root zone was often simulated by using the coupled water and heat transport (CWHT) model during soil freezing-thawing process and influenced by multiple factors such as boundary conditions, parameters determination method, and so on. An improved method based on in-situ measured data was proposed to optimally estimate the parameters in the CWHT model. The applicability of this method was validated as well. The hydraulic parameters in the model were estimated in-situ by fitting soil freezing-thawing characteristic curve (SFC), which showed the relationship between the unfrozen soil water content (USWC) and soil temperature (ST). Then, the effect of surface evaporation (E_s) on prediction accuracy in winter was evaluated. The field experiment was conducted over two winters (2011—2012 and 2012—2013) in an experimental farm at Changping County, Beijing, China. The USWC, ST and E_s were monitored with dielectric tube sensors, temperature sensors and lysimeter, respectively. The data obtained in 2011—2012 were used to fit SFC to optimize the hydraulic parameters, whereas those in 2012—2013 were used to verify the model. The results

收稿日期: 2018-01-31 修回日期: 2018-03-02

基金项目:国家自然科学基金项目(31501231)和北京市优秀人才培养(青年骨干个人)项目(2015000020124G124)

作者简介:程强(1982—),男,副教授,博士,主要从事精细农业先进传感技术与数据分析处理方法研究,E-mail: chengqiang@ cau. edu. cn 通信作者:孙宇瑞(1954—),男,教授,博士生导师,主要从事精细农业先进传感技术研究,E-mail: pal@ cau. edu. cn

showed that the model simulations were agreed well with the field measurements. When considering the effects of E_s on USWC and ST, the root mean square errors (RMSE) of USWC and ST predictions in 2012—2013 were 0.046 m³/m³ and 1.883 °C at 10 cm and 0.071 m³/m³ and 2.347 °C at 20 cm, respectively. In contrast to the condition without E_s , the RMSE for USWC and ST predictions in 2012—2013 were 0.059 m³/m³ and 2.149 °C at 10 cm and 0.081 m³/m³ and 2.666 °C at 20 cm, respectively. Thus, the improved method of parameters determination based on in-situ measured data can ensure the prediction accuracy of the CWHT model. In addition, the accuracy could be further improved with considering the effects of surface evaporation and the effect of surface evaporation on USWC and ST was gradually decreased as the depth increased.

Key words: roots zone of wheat; coupled heat and water transport; soil surface evaporation; numerical simulation; parameter estimation

0 引言

越冬期作物根区充足的蓄水量能够减小作物对 于春季降水的依赖程度,有利于春季冬小麦的生长 并有可能增加产量^[1]。土壤中水分平衡的精确预 测不仅是决定水资源可用性的关键,也对其优化管 理起到了重要作用^[2]。

在季节性冻土区,越冬期冬小麦根区水分的补 给渠道除降水和田间灌溉外,因上层土壤冻结驱动 下层土壤水分向上运移也是冬小麦根区水分补给的 重要来源。随着温度降至0℃以下,土壤上层液态 水变成冰,降低了该层的水势。在水势梯度作用下, 下层土壤的水分开始向上运移,形成一个水热耦合 运移机制。以往许多学者用复杂的数学模型对该机 制进行了研究^[3-8]。

在越冬期土壤的水热耦合运移过程中,土壤未 冻水含量、含冰量和土壤温度是必不可少的3个关 键变量^[8]。土壤冻融特征曲线(Soil freezing characteristic curve, SFC)用于表示冻土中土壤未冻 水含量和温度之间的关系,在模拟冻土的水热耦合 运移过程中起到了重要作用。由于 SFC 和土壤水 分特征曲线(Soil moisture characteristic curve, SMC) 之间的相似性^[9],一些学者利用 SMC 来估算 SFC 进 行冻融过程中的水热耦合运移模拟^[10]。为提高模 型的预测精度,一些学者^[9,11]将针式时域反射计 (TDR)和温度传感器结合获取 SFC,但是在传感器 安装过程中容易破坏土壤结构。而介电管式传感器 能够原位测定土壤未冻水含量,提高了测量精 度^[12-13]。基于原位测量的土壤未冻水含量和温度 数据,得到的水热参数有具体的物理意义,比参数辨 识(反演)法所使用的模型结构简单,并取代田间取 样后在实验室测定土壤参数的传统做法。

此外,由于冬季作物进入休眠期,基本不考虑蒸 腾作用,而土壤表面蒸发量作为边界通量也对根区 的蓄水和热量平衡起着重要作用。土壤上边界的蒸 发量不仅影响地表热通量的变化^[14],还降低了表层 土壤的未冻水含量。然而,以往的研究往往认为冬 季地表蒸发量可能很小甚至可能为零^[15-17]。与这 些研究不同的是,FLERCHINGER 等^[4]在其模型中 引入了一个地表蒸发方程,以完善越冬期水热耦合 运移(Simutaneous heat and water, SHAW)机制,并 在之后的研究中用气象数据对模型进行了测 试^[14,18-19]。SCOTT等^[1]利用 HYDRUS 软件^[7]来模 拟越冬期的非饱和流,通过考虑由最大向上流速或 彭曼潜在蒸发计算得到地表蒸发通量(以较小者为 准)。SAITO 等^[20]和 ZENG 等^[21-22]提出了水-热-蒸汽耦合的数值模型,并证明地表蒸发量对于土壤 中水分运移有重要影响。ZHANG 等^[23]提出的耦合 模型中计算了冻融过程中液态水和蒸发量对于水热 耦合运移的贡献率,结果证明水蒸气在所有的土壤 深度处贡献率都超过了15%,验证了蒸发量作为土 壤冻融模型的上边界条件,在模拟过程尤其是在浅 层土壤中是不可忽略的。

本文基于原位测量的土壤未冻水含量和温度 (2011—2012年),提出一种改进型的冻融过程中水 热耦合运移模型参数估算方法,并将估算参数用于 模型精度的验证过程(2012—2013年)。考虑到地 表蒸发量对土壤水分运移与再分布的重要性,本文 拟构建土壤冻融过程水热耦合运移模型用于模拟越 冬期小麦根区蓄水与能量交换,并探讨冬季地表蒸 发量对土壤水热耦合模型预测精度的影响。

1 材料与方法

1.1 模型介绍

1.1.1 水流通量传输过程

FLERCHINGER 等^[4]在 1989 年提出使用一阶 偏微分方程来模拟冻土和非冻土中的水热耦合运 移,其中水流通量的传输方程^[24](向下为正)为

$$\frac{\partial \theta_l}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_l} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \right] + \frac{1}{\rho_l} \frac{\partial q_v}{\partial z} + U \quad (1)$$

(2)

其中
$$K = K_s \left(\frac{\theta_i}{\theta_s}\right)^{2b+3}$$

式中 K_s ——饱和导水率,m/h
 θ_s ——饱和导水率,m/h
 θ_s ——饱和含水量,m³/m³
 b ——土壤孔隙分布参数
 θ_i ——土壤冰含量,m³/m³
 θ_i ——土壤冰含量,m³/m³
 θ_i ——土壤冰含量,m³/m³
 ρ_i ——秋密度,kg/m³
 ρ_i ——漆态水密度,kg/m³
 q_s ——蒸汽通量,m/h
K——非饱和导水率,m/h
 ψ ——土壤基质势,m
 U ——水通量的汇项,m³/(m³·h)
 z ——十壤深度,m t ——时间,h

式(1)各项依次代表:体积含水率的变化量:体积含 冰量的变化量:流入土壤层的净液态水通量:进入土 壤层的水蒸气含量;由于根系吸收而形成的一个汇项。

土壤基质势 ψ 可通过 Campbell 模型^[25]计算, 即

$$\psi = \psi_e \left(\frac{\theta_l}{\theta_s}\right)^{-b} \tag{3}$$

式中 U, ——空气进入势, kPa

由 Richards 方程可以得到

$$D(\theta_{l}) = K(\theta_{l}) \frac{\partial \psi}{\partial \theta_{l}}$$
(4)

式中 D-----土壤中水分的扩散率,m/h

地表蒸发量作为土壤表层的水流通量,影响了 冻融过程中的水热耦合运移,则由式(1)、(4)可得

$$\frac{\partial \theta_{l}}{\partial t} + \frac{\rho_{i}}{\rho_{l}} \frac{\partial \theta_{i}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D(\theta_{l}) \frac{\partial \theta_{l}}{\partial z} - K(\theta_{l}) \right)$$
(5)

由达西定律可得

$$q_{l} = -D(\theta_{l})\frac{\partial\theta_{l}}{\partial z} + K(\theta_{l})$$
(6)

式中 q,——水流通量,m/h

在上边界处 q,为地表蒸发量。该模型以上边界 上的水流通量(即蒸发量)作为驱动力,计算下一个 迭代时间上的液态水含量;另一方面,冻土中水分的 流动同时会产生热对流,进而影响土壤中的热量传 输。

1.1.2 热量传输过程

土壤基质中热量传输(包括液态水产生的热对 流和蒸发吸收的潜热)方程为

$$C_{s} \frac{\partial T}{\partial t} - \rho_{i} L_{f} \frac{\partial \theta_{i}}{\partial t} + L_{v} \left(\frac{\partial q_{v}}{\partial z} - \frac{\partial \rho_{v}}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{s} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho_{i} c_{i} \frac{\partial q_{i} T}{\partial z} + S$$
(7)

式中 C_{i} ——土壤体积热容, J/($m^3 \cdot C$) T----土壤温度,℃ ρ_v ——水蒸气密度,kg/m³ L_e——融化潜热,kJ/kg L_-----蒸发潜热,kJ/kg λ.——土壤热传导率,W/(m·℃)

S——土壤层的源项, $m^3/(m^3 \cdot h)$

式(7)中各项依次代表:因温度升高储存的比 热:水冻结成冰所需要的潜热:土壤层中的净蒸发潜 热;进入土壤层的净热传导;由于液态水通量产生的 热对流;土壤层的源项(可能包括太阳辐射和长波 辐射)。当不考虑地表蒸发的影响时,忽略净蒸发 潜热项。

土壤体积热容 C.是土壤各组分的体积热容之 和,其计算公式为

$$C_s = \sum \rho_j c_j \theta_j \tag{8}$$

七中 ρ_i, c_i, θ_i ——土壤的第*j*个组成成分的密度、 比热容和体积分数

DE VRIES^[26]提出了用于计算土壤的热传导率 λ 的理论,该理论认为非常湿润的土壤可以看作是 混合了液态水、土壤颗粒、冰晶以及分散的空气的连 续介质。这种理想模型下的土壤热导率的计算公式 为

$$\lambda_{s} = \frac{\sum m_{j} \lambda_{j} \theta_{j}}{\sum m_{j} \theta_{j}}$$
(9)

式中 m_i 、 λ_i 为土壤的第j个组成成分的权重因子、热 传导率,例如砂粒含量、粉粒含量、黏粒含量、有机质 含量、冰、液态水、空气含量等。DE VRIES^[26]讨论 了关于权重因子 m₁的计算方法。

1.2 参数估算

土壤冻融特征线(SFC)是指冻土中的温度(0℃ 之下)和未冻水含量之间的关系,在构建冻融过程 中土壤中水热耦合运移,尤其是优化数值模型的参 数时发挥了重要作用^[12]。当土壤中出现冰时,液态 水和固态冰的压强与温度有关,它们之间的关系为

$$\frac{p_l - \pi}{\rho_l} - \frac{p_i}{\rho_i} = L_f \frac{T}{T_K} \quad (T < 0)$$
(10)

式中 p₁---液相的压强,Pa

p, ——冰的压强, Pa

π-----土壤溶质的渗透压, Pa

T_κ——绝对温度,K

假设土壤在低盐度条件下,渗透压为零;且冰中 为零压力,则方程(10)可简化为^[27]

$$\psi = \frac{L_f}{g} \frac{T}{T_\kappa} \quad (T < 0) \tag{11}$$

式中 g——重力加速度,m/s²

假设未冻土中水流通量和土壤水分特征线在冻 土中同样适用,则由方程(3)、(11)可得

$$\theta_l = \theta_s \left(\frac{L_f}{g\psi_e} \frac{T}{T_K} \right)^{-\frac{1}{b}}$$
(12)

冻土中同时测量得到的温度和液态水含量确定 了 SFC,根据方程(12)可以得到 T < 0 时, θ_i 与 T 之 间为幂函数关系(图 1),通过曲线拟合可得到相应 的统计学参数,进而反演出 ψ_e 和 b 的值,分别为 – 127 kPa和 2.5。





1.3 边界条件

模型中的边界条件分为第1类边界条件和第2 类边界条件。其中第1类边界条件是指在上边界给 出了空气温度值;第2类边界条件是指在上边界给 出了向上的水流通量(即蒸发量)的值(图2)。从 2011—2012 年和 2012—2013 年两个冬季的空气温 度和蒸发量的值可知,2011—2012 年冬季空气最低 温度为-18.16℃,在11 月 24 日左右温度降至 0℃ 左右,之后温度一直下降至 0℃以下,进入冻结期, 直至 3 月中旬时温度上升至 0℃以上,且存在明显 的融化潜热阶段;2012—2013 年空气最低温度为 -22.68℃,冻融期约为 2012 年 11 月 29 日至 2013 年 3 月 1 日,空气温度波动较大,融化潜热阶段不明 显。

1.4 研究区概况

试验区位于北京市昌平区小汤山精准农业基地 (116°26′39″E,40°10′43″N),属于大陆性季风气候, 年平均降雨量为587 mm,年平均温度为11.7℃。该 基地属于季节性冻土区,每年11—12月土壤开始冻 结,2—3月开始融化,越冬期(11—3月)平均降雨 量约为42 mm,土壤平均温度约为-1.1℃。按照国 际制土壤质地分级标准,试验区土壤被划分为粉砂 质壤土,其砂粒、粉粒和粘粒所占比例分别为 39.9%、46.6%和13.5%,土壤饱和含水量为 0.41 m³/m³,饱和导水率为0.01 m/h。

进行田间试验时,在每个测量点处,将6根 PVC 管(长2m、直径50mm)以2m的间隔垂直插入土壤 中,使用介电管式传感器(Diviner 2000型, Sentek Sensor Technologies)进行不同深度土壤水分的测



量,测量间隔为 10 cm。土壤未冻水含量可通过介 电常数计算得到^[22],测量点的液态水含量取 6 个点 的平均值,其水平和垂直方向上的其他位置数据通 过插值计算获得。土壤温度使用一组数字化传感器 DS18B20 型(DS18B20 +, Maxim Integrated)进行测 量,其精度为 0.5 (在 -55~ 125 2id)。在距介 电管式传感器 1 m 远的位置挖洞,直径为 5 cm,将温 度传感器以 10 cm 的间隔放入洞中。在放置温度传 感器时,不断地将该位置的原土壤填回至洞中^[8]。

土壤蒸发量作为模型的边界条件,使用基地的称重式蒸渗仪系统得到。试验所用蒸渗仪数据为24套中型蒸渗仪(长1m、宽0.75m、高2.3m)测量的平均值。每套蒸渗仪采用杠杆式称重系统,在利用平衡块抵消土箱和土体质量后,使用质量传感器测量土壤中水分质量,以反映土壤的蒸发量的变化^[28]。传感器的测量频率为每15min一次,灵敏度为0.05~0.1mm。

1.5 误差分析

(1)均方根误差(Root mean square error, RMSE)用于反映估算值和实测值之间的总体差异, 对特大或特小误差反映敏感。当 RMSE 越接近于 0 时,表明估算误差越小,模拟精度越高。其计算公式为

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (S_i - M_i)^2}$$
(13)

式中 M_i——实测值 S_i——模拟值

N——实测样本数

(2)平均偏差(Mean bias error, MBE)用于反映 估算值和实测值之间的平均偏差,正值表示蒸散量 被高估,负值表示被低估。MBE 越接近于 0 时,精 度越高。其计算公式为

$$M_{BE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (S_i - M_i)$$
(14)

(3)d值表示模拟值和实测值之间的一致性和 精确度,取值范围0≤d≤1,当d越接近1时,代表 模型的模拟值精确度越接近100%。其计算公式为

- 2 结果与讨论
- 2.1 2011—2013 年两年冬季冻融过程的实测和模 拟结果比较

春季冬小麦返青期之前其根系分布范围约为

0~20 cm^[29-30],因此根据土壤 10 cm 和 20 cm 处未 冻水含量和温度的模拟值和实测值的对比情况来分 析冬小麦根区的水热运移(图3、4)。在2011-2012 年冬季,基于原位测量的土壤未冻水含量和土壤温 度(负温条件时)得到的 SFC 参数和考虑了地表蒸 发量的水热耦合运移模型进行数值模拟,土壤温度 模拟值与实测值拟合度较高,模拟效果较好(d值均 在 0.95 左右, 表 1)。由于冻土中未冻水含量主要 受温度影响,未冻水含量的模拟精度也达到较高水平, 其中,10 cm 处 d 值为 0.930, RMSE 为 0.036 m³/m³, 20 cm 处 d 值为 0.870, RMSE 为 0.055 m³/m³。在 温度逐渐下降至0℃,土壤20 cm 处的未冻水逐渐冻 结的过程中,模拟值出现一定的低估,但是土壤温度 的模拟值和实测值之间该现象并不明显。出现这种 情况的原因可能是在 SFC 的标定过程中(图1),使 用整个冻融过程的冻土温度和未冻水含量数据进行 曲线拟合,但 SFC 曲线在冻结-融化过程中存在滞 后效应,土壤冻结时速度较快,难以满足稳态或准稳 态的假设条件^[10,31],在冻结阶段,相同的温度条件 下拟合曲线的未冻水含量值相对于实测值偏低。在 融化阶段,由于不同深度处土壤温度的高估导致未 冻水含量出现不同程度的高估,如2011-2012年冬 季 20 cm 处融化阶段的温度高估了 0.3℃,但是未冻 水含量却上升了约0.1 m³/m³。0℃附近较小的温 度变化可能引起未冻水含量的较大差异(图1),这 主要是受融化潜热的影响, 而拟合的 SFC 曲线在融 化阶段的相对高估也是影响未冻水含量预测精度的 原因之一。

将 2012—2013 年的土壤表层蒸发量、空气温 度、土壤初始温度和未冻水含量作为输入数据,利用 数值模型和已估算的 SFC 参数可得到未冻水含量 的预测值,将该预测值和实测值进行对比分析来验 证模型的适用性。整个冻融过程中,预测值能够较 好地追踪到土壤中温度和未冻水含量的动态变化, 土壤温度的模拟值整体偏低,在土壤冻结后以及融 化过程中精度相对提高(图 3、4)。未冻水含量在 10 cm 和 20 cm 处模拟值的 *d* 值分别为 0.924 和 0.774, RMSE 分别为 0.046 m³/m³ 和 0.071 m³/m³ (表 2)。在冻结阶段,土壤温度的模拟值出现了明 显的低估,从而导致未冻水含量在冻结过程中的低 估(图 3)。

2012—2013 年土壤冻融过程水热耦合运移模型的数值模拟结果具有较高精度(表 2),验证了这种基于原位测量数据的改进型模型参数估算方法的可行性与适用性。传统的田间取样方法是指在观测 点周围取土样,然后在实验室环境下测定水热参数。





然而,土壤的空间变异性会引起较大的误差,取样过 程还会对土壤的结构造成破坏,影响测量精度。此 外,从田间取样到实验室测定参数还耗费了大量的 人力和时间成本。CHENG 等^[12]比较了由原位测量 的 SFC 推导出的土壤水分特征曲线(0.806 $\leq R^2 \leq$ 0.994)和田间取样后实验室压力盘测定的土壤水 分特征曲线(0.980 $\leq R^2 \leq$ 0.997),结果表明该方法 的估算精度与传统方法相比在重叠区差异很小,证 明了该方法的有效性。

2.2 蒸发量对模型预测结果的影响

为分析越冬期地表蒸发量对土壤水分运移的影响程度,在忽略蒸发量影响的假设下运用模型模拟 出一组未冻水含量的变化情况。根据 2012—2013 年冬季冻融过程中土壤未冻水含量有无蒸发时的对



图 4 2011—2012 年和 2012—2013 年两个越冬期土壤 10 cm 和 20 cm 处温度模拟值与实测值比较

Fig. 4 Comparisons of simulated and measured soil temperatures at 10 cm and 20 cm across two winters of 2011-2012 and 2012-2013

表 1 2011—2012 年冬季土壤未冻水含量和温度误差分析 Tab. 1 Analysis of soil unfrozen water content and

b.1 Analysis of soil unfrozen water content and temperature in winter of 2011-2012

, 1-3	未冻水含量			温度			
土壤 深度/cm	RMSE/	MBE/	,	RMSE/	MBE/	L	
	$(\mathbf{m}^3 \cdot \mathbf{m}^{-3}) (\mathbf{m}^3 \cdot \mathbf{m}^{-3})$		°C	°C	a		
10	0.036	0.012	0.930	1.222	0.348	0.945	
20	0.055	0.023	0.870	0.975	0.688	0.955	

比(图 3c、3d),可以发现在不考虑蒸发时,未冻水含量和温度的模拟值均高估,且随着冻融过程的进行, 地表蒸发量对未冻水含量的累计影响越来越明显。 在融化阶段不考虑蒸发时,比考虑蒸发影响高估约 0.024 m³/m³,约占土壤未冻水含量的 16%。对比 不同土壤深度处蒸发量的影响,发现蒸发量对于土 壤冻融过程中未冻水含量的影响随着土壤深度的增 加而逐渐减小。在模型中加入地表蒸发量作为边界 条件后,模型的模拟精度普遍提高,尤其是在土壤表 层。对有无蒸发条件下模拟值与实测值之间进行误 差分析(表 2)可以发现:考虑蒸发量的影响后, 10 cm 处的模拟值的 *d* 值由 0.892 增加至 0.924, RMSE 由 0.059 m³/m³降为 0.046 m³/m³, 而 20 cm 处的影响较小。因此,对越冬期小麦根区的未冻水 含量的模拟应该考虑蒸发量的影响,尤其是接近土 壤表层^[17]。

越冬期土壤冻融过程中,2012—2013年的蒸发 量较前一年较高(图 2),对模型的预测精度影响较

	表 2 2012—2013 年冬李有尤烝友时土壤木冻水含重和温度模拟值误差对比分析
Tab. 2	Analysis of soil unfrozen water content and temperature with or without soil evaporation in winter of 2012-2013

边界条件	土壤深度/	未冻水含量			温度		
	cm	$RMSE/(m^3 \cdot m^{-3})$	$MBE/(m^3 \cdot m^{-3})$	d	RMSE/℃	MBE∕℃	d
有蒸发	10	0.046	0.003	0.924	1.883	0.209	0. 918
	20	0.071	0.015	0.774	2.347	0.689	0.833
无蒸发	10	0.059	0.019	0.892	2.149	0.734	0. 898
	20	0.081	0.021	0.763	2.666	1.182	0. 794

大。出现该现象的原因是该年冬季降水量相对较 大,使土壤表层含水量增加,从而增加了地表蒸发 量。因此,模型的预测精度也会受到气候条件等的 影响。

3 结论

(1)提出了一种土壤冻融过程水热耦合运移参数原位估算方法,借助 2011—2012 年原位测定的试验数据拟合 SFC 曲线,对土壤水热参数进行最优估算,然后检验了该方法的适用性。结果表明:2012—2013 年冬季土壤冻融过程中模型的模拟值与实测值拟合度较高,能够准确预测越冬期小麦根区未冻水含量与温度的变化规律,10 cm 处土壤未冻水含量和温度的 d 值分别达到 0.924 和 0.918,20 cm 处达到 0.774 和 0.833。可见,该方法估算的水热参数能够保证模型的预测精度,从而取代田间取样并在实验室测定土壤参数的传统做法,比参数辨识(反演)法所使用的模型结构简单,不破坏土壤结

构,节省了人力和时间成本。

(2)为检验地表蒸发量对模型精度的影响,对 2012—2013年越冬期的模拟值和实测值进行误差 分析,10 cm 处的未冻水含量预测值的 d 值由 0.892 增加为 0.924,RMSE 由 0.059 m³/m³降为 0.046 m³/m³。 结果表明,考虑地表蒸发量对土壤冻融过程中水热 运移的影响后,土壤表层未冻水含量预测精度明显 提高。此外,随着土壤深度的增加,蒸发量的影响逐 渐减小。

(3)除土壤边界条件和气候因素外,SFC曲线 在冻融过程的滞后效应可能是造成模拟过程中冻结 阶段低估和融化阶段高估的重要原因。且土壤在经 历多次冻融循环后,纹理结构和孔隙分布等物理性 质可能会产生改变,进而影响 SFC。因此,SFC曲线 及其参数的标定和修正是土壤冻融过程中进行水热 耦合运移数值模拟的重要步骤,也需要在未来的研 究中找出更加适当和精确的模型标定与参数估算方 法。

参考文献

- 1 SCOTT R L, SHUTTLEWORTH W J, KEEFER T O, et al. Modeling multiyear observations of soil moisture recharge in the semiarid American Southwest[J]. Water Resources Research, 2000, 36(8):2233 2247.
- 2 SHELIA V, ŠIMŮNEK J, BOOTE K, et al. Coupling DSSAT and HYDRUS 1D for simulations of soil water dynamics in the soilplant-atmosphere system[J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2017, 66(2): 232 - 245.
- 3 HARLAN R L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil[J]. Water Resources Research, 1973, 9(5):1314-1323.
- 4 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.
- 5 JAME Y W, NORUM D I. Heat and mass transfer in a freezing unsaturated porous medium [J]. Water Resources Research, 1980, 16(4):811-819.
- 6 ZHAO L, GRAY D M, MALE D H. Numerical analysis of simultaneous heat and mass transfer during infiltration into frozen ground [J]. Journal of Hydrology, 1997, 200(1-4):345-363.
- 7 ŠIMŮNEK J, GENUCHTEN M T V, WENDROTH O. Parameter estimation analysis of the evaporation method for determining soil hydraulic properties [J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62(4):894 905.
- 8 CHENG Q, SUN Y, JONES S B, et al. In situ measured and simulated seasonal freeze-thaw cycle: a 2-year comparative study between layered and homogeneous field soil profiles [J]. Journal of Hydrology, 2014, 519:1466 1473.
- 9 SPAANS E J A, BAKER J M. The soil freezing characteristic: its measurement and similarity to the soil moisture characteristic [J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(1):13-19.
- 10 WATANABE K, OSADA Y. Comparison of hydraulic conductivity in frozen saturated and unfrozen unsaturated soils[J]. Vadose Zone Journal, 2016, 15(5):0154.
- 11 FLERCHINGER G N, SEYFRIED M S, HARDEGREE S P. Using soil freezing characteristics to model multi-season soil water dynamics[J]. Vadose Zone Journal, 2006, 5(4):1143-1153.
- 12 CHENG Q, SUN Y, XUE X, et al. In situ determination of soil freezing characteristics for estimation of soil moisture

characteristics using a dielectric tube sensor[J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78:133-138.

- 13 SUN Y, CHENG Q, XUE X, et al. Determining in-situ soil freeze-thaw cycle dynamics using an access tube-based dielectric sensor[J]. Geoderma, 2012,189-190(6):321-327.
- 14 GUO D, YANG M, WANG H. Characteristics of land surface heat and water exchange under different soil freeze/thaw conditions over the central Tibetan Plateau[J]. Hydrological Processes, 2011, 25(16):2531-2541.
- 15 雷志栋,尚松浩,杨诗秀.地下水浅埋条件下越冬期土壤水热迁移的数值模拟[J].冰川冻土,1998,20(1):51-54. LEI Zhidong, SHANG Songhao, YANG Shixiu. Numerical simulation on simultaneous soil moisture and heat transfer under shallow ground water table in winter[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, 20(1):51-54. (in Chinese)
- 16 雷志栋,尚松浩,杨诗秀,等. 土壤冻结过程中潜水蒸发规律的模拟研究[J]. 水利学报,1999,21(6):6-10. LEI Zhidong, SHANG Songhao, YANG Shixiu, et al. Simulation on phreatic evaporation during soil freezing[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 21(6):6-10. (in Chinese)
- 17 LI S, LAI Y, PEI W, et al. Moisture-temperature changes and freeze-thaw hazards on a canal in seasonally frozen regions [J]. Natural Hazards, 2014, 72(2):287-308.
- 18 FLERCHINGER G N, SAXTON K E. Simultaneous heat and water model of a freezing snow-residue-soil system II [J]. Transactions of the ASAE, 1987, 32(2):573-576.
- 19 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? 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46 (Supp.): 274 - 282. (in Chinese)

- 20 SAITO H, ŠIMŮNEK J, SCANLON B R, et al. Numerical analysis of coupled water, vapor and heat transport in the vadose zone using HYDRUS[J]. Vadose Zone Journal, 2006, 5(2):784 800.
- 21 ZENG Y, SU Z, WAN L, et al. A simulation analysis of the advective effect on evaporation using a two-phase heat and mass flow model[J]. Water Resources Research, 2011, 47, W10529, doi:10.1029/2011WR010701.
- 22 ZENG Y. Coupled dynamics in soil: experimental and numerical studies of energy, momentum and mass transfer[M]. Berlin: Springer, 2013.
- 23 ZHANG M, WEN Z, XUE K, et al. A coupled model for liquid water, water vapor and heat transport of saturated-unsaturated soil in cold regions: model formulation and verification [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(8):701.
- 24 LI R, SHI H, FLERCHINGER G N, et al. Simulation of freezing and thawing soils in Inner Mongolia Hetao Irrigation District, China[J]. Geoderma, 2012,173 - 174:28 - 33.
- 25 CAMPBELL G S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data[J]. Soil Science, 1974, 117(6):311-314.
- 26 DE VRIES D A. Thermal properties of soils [M] // VAN WIJK W E. Physics of plant environment. Amsterdam: North Holland, 1966: 210-235.
- 27 FUCHS M, CAMPBELL G S, PAPENDICK R I. An analysis of sensible and latent heat flow in a partially frozen unsaturated soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 1978, 42(3):379 - 385.
- 28 毛思帅,薛绪掌,张兴娟,等.基于称重式蒸渗仪研究早播与晚播条件下4个冬小麦品种的耗水特征[C]//第十五次中国小麦栽培科学学术研讨会论文集,2012.
- 29 刘荣花,朱自玺,方文松,等. 冬小麦根系分布规律[J]. 生态学杂志, 2008, 27(11):2024 2027. LIU Ronghua, ZHU Zixi, FANG Wensong, et al. Distribution pattern of winter wheat root zone[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008,27(11):2024 - 2027. (in Chinese)
- 30 王亚萍, 胡正华, 张雪松,等. 土壤水分胁迫对冬小麦根系分布规律的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(11):67-71.
- 31 WATANABE K, OSADA Y. Simultaneous measurement of unfrozen water content and hydraulic conductivity of partially frozen soil near 0°C [J]. Cold Regions Science & Technology, 2017, 142:79 - 84.