

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.036

越冬期麦田地表蒸散量估算模型适用性分析与参数修正

程强¹ 徐强¹ 陈超¹ 孙宇瑞¹ 王忠义¹ 薛绪掌²

(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: 地表蒸散量是作物需水量估算以及农田水管理的重要依据。越冬期农田地表蒸散过程改变了土壤内部水热参数分布,进而影响春季作物的生长状况。本文对 Penman - Monteith (PM) 模型、Priestley - Taylor (PT) 模型和 Simultaneous heat and water (SHAW) 模型在越冬期麦田地表蒸散量估算精度及适用性进行分析与评价,并针对冬季土壤冻结的特殊情况对模型参数进行了修正。麦田试验采集了北京市昌平区 2011—2012 年和 2012—2013 年 2 个冬季的气象参数与实际蒸散量。通过对比 3 种模型默认或经验参数下的估算值与实际测量值发现:PT 模型对蒸散量的估算精度最高 (PT、PM、SHAW 模型 RMSE 分别为 0.159、0.697、0.390 mm),PM 和 PT 模型的估算整体高于实际测量值,其原因在于冬季地表经历了固-液相变和气-液相变两个过程。为了提高估算精度,在 PT 和 PM 模型中引入水分胁迫系数,并利用第 1 年冬季的数据对 3 种模型参数进行修正,结果表明,修正后的 PM 模型 (2011—2012 年 RMSE 为 0.159 mm) 和 SHAW 模型 (2011—2012 年 RMSE 为 0.280 mm) 对蒸散量的估算精度都有明显提高。将参数修正后的模型用于预测 2012—2013 年冬季的地表蒸散量,结果表明:3 种修正模型的估算精度均较高 (PT、PM、SHAW 模型 RMSE 分别为 0.267、0.252、0.253 mm)。相比之下,PT 模型的计算最为简单,所需数据最少,因此,在估算越冬期麦田地表蒸散量时,可优先选择 PT 模型。

关键词: 麦田; 越冬期; 地表蒸散量; 适用性; 参数修正

中图分类号: S271 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)10-0317-09

Applicable Analysis and Parameter Modification of Evapotranspiration Models during Wintertime

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

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

2. Beijing Research Centre of Intelligent Equipment for Agricultural, Beijing 100097, China)

Abstract: Field evapotranspiration is an important parameter for crop water requirements estimation and farmland water management, which affects the distribution of soil water and heat parameters during the wintertime and potentially affects crop growth in next spring. So far, Penman - Monteith (PM) model, Priestley - Taylor (PT) model and simultaneous heat and water (SHAW) model are widely used for surface evapotranspiration estimation. However, only the SHAW model is used for the estimation of surface evapotranspiration in wintertime, and the applicability of PM and PT models in the winter still needs to be verified. The accuracy and applicability of the above three models were analyzed and evaluated for estimating surface evapotranspiration in wheat fields overwinter. Parameters in models were modified by considering the latent heat during water-ice phase change. Meteorological parameters and actual evapotranspiration during the winter of 2011—2012 and 2012—2013 were collected in an experimental field, Changping County, Beijing, China. The estimated values using the default or empirical parameters of the three models were compared with the actual measured values, showing that the accuracy of PT model for evapotranspiration was the highest (RMSE was 0.159 mm for the PT model, 0.697 mm for the PM model and 0.390 mm for the SHAW model), but PM and PT models overestimated

收稿日期: 2018-01-03 修回日期: 2018-03-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(31501231)、北京市优秀人才培养(青年骨干个人)项目(2015000020124G124)和北京市农林科学院创新能力建设专项(KJCX20151411)

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: 薛绪掌(1967—),男,研究员,博士,主要从事农业节水理论与技术研究,E-mail: xuexz@nercita.org.cn

the evapotranspiration, which were attributed to the solid-liquid and gas-liquid phase changes of soil surface. In order to improve the accuracy of the estimation, a water stress coefficient in the PT and PM models was introduced to modify the three model parameters by using the data of the first year of winter. The results showed that the estimated accuracies of evapotranspiration were significantly improved by the modified PM model (RMSE was 0.159 mm during 2011—2012) and the SHAW model (RMSE was 0.280 mm during 2011—2012). The modified models were used to estimate the surface evapotranspiration in the winter of 2012—2013. The results showed that the accuracy of the three models remained high and acceptable (RMSE was 0.267 mm for PT model, 0.252 mm for PM model and 0.253 mm for SHAW model). In comparison, the PT model had a simple form and required less parameter input. Therefore, the PT model can be preferentially chosen when estimating surface evapotranspiration during wintertime.

Key words: wheat field; wintertime; surface evapotranspiration; applicability; parameter modification

0 引言

地表蒸散量是土壤水分和热量平衡的重要影响因素,也是作物需水量估算以及农田水分管理的重要依据^[1-2]。冬季,温度降低,作物进入休眠期,蒸腾作用往往忽略不计,只考虑土壤表层的蒸发作用。此外,越冬期积雪覆盖和土壤中冰的形成降低了地表蒸散量,因此,在研究冬季土壤水热运移过程时,前人通常将冬季土壤的蒸发量简单地设置为零或忽略不计^[3]。但研究证明,冬季蒸发确实存在,且对土壤的水热运移及分布具有重要影响^[4]。因此,越冬期地表蒸散量的准确估算不仅能够为春季作物生长过程的水分管理提供重要依据,还对揭示土壤与环境之间的质量与能量交换规律有着重要意义。

蒸散量的测量可分为实际测量和理论计算两种方法。实际测量包括水量平衡法、蒸渗仪法、涡度相关法、波文比能量平衡法以及遥感法等^[5]。其中,蒸渗仪法近年来在我国得到了普遍开展^[6-9],测量精度较高,但是该方法要求取样具有代表性,且需要定期校正标定系数,操作复杂。理论计算是指利用气象数据通过蒸散模型进行估算。目前,有多种模型可估算地表蒸散量,但是由于气象环境和土壤条件的多样性,很难确定唯一的适用性较广的模型^[10]。FLERCHINGER等^[11]在1989年提出的SHAW模型能够用于估算冬季地表蒸散量。成向荣等^[12]、刘峻明等^[13]用SHAW模型模拟冻融过程中土壤中水、热、蒸发量等的运移过程,并验证了其具有较高的预测精度,证明了SHAW模型在冬季土壤条件模拟的适用性。

由FAO提出的PM模型^[14]以其坚实的理论基础和较高的计算精度,经常用于蒸散量的预测。但是当地表植被组成复杂或无植被时预测精度不高,且需要大量的气象数据与相关参数作为计算基础,在数据缺乏时难以准确预测^[15]。文献[16-18]利用PM模型和Penman修正公式对全年的蒸散量进

行估算,发现其相对误差在11—2月较大,不适用于冬季蒸散量的预测。PT模型对PM模型进行简化,不考虑空气动力学的影响,以平衡蒸发为基础,引进常数 α ,进行蒸散量的预测。 α 为经验参数,受地理特征和年降水量的影响,具有年际和季节的时间变化特性,需要对 α 进行调整来修正模型^[15,19-20]。但是这两种模型能否用于越冬期蒸散量的预测还有待验证。为此,本文首先对SHAW、PM和PT模型在默认或经验参数下估算的冬季地表蒸散量与实际蒸散量进行比较,分析模型估算误差,在此基础上对模型参数进行修正,并借助第2年冬季的实际测量数据评价模型的适用性。

1 材料与方法

1.1 模型介绍

1.1.1 PM模型

由FAO提出的Penman-Monteith (PM)模型具有坚实的理论基础和较高的计算精度,被广泛用于蒸散量的预测。在计算作物蒸散量时,由于地表及作物冠层气象环境的复杂性、作物种类、区域环境等的差异性等,FAO规定用PM模型来计算作物的参考作物蒸散量作为标准方法。该方法假设作物为0.12 m高的苜蓿,表层阻力为70 s/m,反射率为0.23,其计算公式为

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中 ET_0 ——参考蒸散量, mm/d

R_n ——作物表层净辐射, MJ/($m^2 \cdot d$)

G ——土壤热通量, MJ/($m^2 \cdot d$)

T ——2 m 高处的日平均温度, $^{\circ}C$

u_2 ——2 m 高处的风速, m/s

e_s ——饱和水汽压, kPa

e_a ——实际水汽压, kPa

Δ ——饱和水汽压-气温关系斜率, kPa/ $^{\circ}C$

γ ——干湿计常数, kPa/°C

该模型综合考虑了空气动力学和辐射对于蒸散量的影响, 其中, 空气动力学项依赖于饱和水汽压亏缺 ($e_s - e_a$), 可由空气相对湿度得到; 辐射项可由太阳辐射计算得到。

当土壤中水分充足时, 实际蒸散量除与气象因素有关外, 只和作物本身特性相关。因此, 引入作物系数 (K_c) 来表示作物种类的不同对于蒸散量的影响^[21], 即

$$ET = K_c ET_0 \quad (2)$$

式中 ET ——实际蒸散量, mm/d

本文中越冬期冬小麦的作物系数取 0.614^[21]。该系数较生长期偏低, 这是因为在越冬期由于温度过低使冬小麦停止生长, 主要反映的是地表蒸发量。

在未冻土中, 当土壤中含水率较高时, 具有较高的势能, 使得水分能够相对自由地移动并容易被作物根系吸收; 而含水率低时, 由于毛细管力和土壤基质势的吸力, 使得势能降低, 水分不易被作物吸收。当势能降低到某一阈值时 (通常取 -1 500 kPa), 作物即受到水分胁迫^[14, 22]。而在越冬期的冻土中, 冰的存在降低了土壤的基质势, 在负温条件下, 温度每降低 1°C, 土壤基质势降低约 1 110 kPa^[23], 因此冻土的土壤状态类似于水分胁迫。在水分胁迫条件下, 实际蒸散量除受到气象因素和作物本身特性的影响之外, 还受到土壤含水率的限制^[24]。考虑到土壤冻结与未冻土壤脱湿过程的相似性, 引入水分胁迫系数 (K_s) 对 PM 模型进行参数修正, 即

$$ET = K_s K_c ET_0 \quad (3)$$

式中 $K_s \leq 1$, 当 $K_s = 1$ 时, 表示无水分胁迫影响。 K_s 值与土壤含水率 (θ , m^3/m^3) 密切相关, 许多学者对两者之间的函数关系进行研究, 发现在未冻土中, K_s 与 θ 之间的函数关系可用线性、幂函数以及分段函数等进行表示, 两者之间的复杂关系还体现在易受气象条件、土壤类型、作物种类等的影响^[24]。本文假设冻土中的 K_s 与 θ 之间存在线性关系。

1.1.2 PT 模型

PRIESTLEY 和 TAYLOR 于 1972 年提出估算蒸散量的模型

$$ET_{p-t} = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \quad (4)$$

式中 ET_{p-t} ——PT 模型参考作物蒸散量, mm/d
 α ——Priestley - Taylor 系数, 经验值为 1.26

该模型忽略了空气动力学项对于蒸散量的影响, 假定 ET_{p-t} 只依赖于太阳辐射和温度。 α 为经验参数, 受地理特征和年降水量的影响, 且具有年际和季节的时间变化特性, 因此, 需要对 α 进行调整

来修正模型^[15]。同样, 在计算越冬期地表蒸散量时, 由于在冻结土壤中, 温度与液态水含量关系密切 (土壤冻结特征曲线)^[25], 本文在 α 基础上引入水分胁迫系数, 即

$$ET = K_s ET_{p-t} \quad (5)$$

同样假设冻土中的 K_s 与 θ 之间存在线性关系。

1.1.3 SHAW 模型

FLERCHINGER 和 SAXTON 在 1989 建立的 SHAW 模型主要用于植物冠层-雪-枯落物-土壤的冻融过程中的水热耦合运移, 不仅可以模拟土壤的水分、温度、冻结深度、冰含量等, 还可以模拟蒸发、蒸腾、能量通量等^[11]。1991 年加入了植物层系统, 在原土壤元素的基础上, 不仅可以计算土壤数据, 还可以设置不同的作物种类同时存在于系统中, 实现作物层内的蒸散发及能量平衡的模拟^[26]。在该模型中, 地表蒸发和热通量通过土壤表层的能量平衡计算获取。

模型中植物冠层蒸汽通量的变化为

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_e \frac{\partial \rho_v}{\partial z} \right) + E_l \quad (6)$$

其中

$$\rho_v = \rho_{vs} h_r = \rho_{vs} \exp \left(\frac{M_w g}{RT_k} \psi \right) = \rho_{vs} \exp \left(\frac{M_w g}{RT_k} a_c \theta_l^{b_c} \right) \quad (7)$$

式中 k_e ——冠层内的传输系数, m^2/s

ρ_v ——蒸汽密度, kg/m^3

z ——冠层高度, m

E_l ——冠层的蒸发或蒸腾量, $kg/(s \cdot m^3)$

ρ_{vs} ——饱和蒸汽密度, kg/m^3

h_r ——相对湿度, %

M_w ——水的分子质量, 0.018 kg/mol

g ——重力加速度, 9.81 m/s^2

R ——通用气体常数, 8.31 J/(mol·K)

T_k ——开氏温度, K

ψ ——土壤基质势, m

θ_l ——液态水含量, m^3/m^3

a_c, b_c ——经验系数, 分别取 -53.72 和 1.32

式(6)中各项依次代表冠层内蒸汽变化量, 进入冠层的蒸汽量, 冠层的蒸发或蒸腾量。

枯落物层的蒸汽通量变化过程为

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_v \frac{\partial \rho_v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h_r \rho_{vs} - \rho_v}{r_h} \right) \quad (8)$$

式中 k_v ——枯落物层内的传输系数, m^2/s

r_h ——枯落物层与空气之间的传输阻力, s/m

式(8)中的各项分别代表枯落物层的蒸汽变化量, 进入枯落物层的净水汽通量和枯落物层的蒸发

速率。

土壤中的水量传输过程为

$$\frac{\partial \theta_i}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_l} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] + \frac{1}{\rho_l} \frac{\partial q_v}{\partial z} + U \quad (9)$$

$$\text{其中 } q_v = q_{vp} + q_{vT} = -D_v \rho_v \frac{dh_r}{dz} - \zeta D_v h_r s_v \frac{dT}{dz} \quad (10)$$

$$D_v = D'_v b_v \theta_a^{c_v} \quad (11)$$

式中 K ——非饱和导水率, m/s

q_v ——蒸汽通量, m/d , 由水势梯度 (q_{vp}) 和温度梯度 (q_{vT}) 所引起的蒸汽变化总量

θ_i ——含冰量, m^3/m^3

ρ_i ——冰的密度, kg/m^3

ρ_l ——水的密度, kg/m^3

U ——由于作物根系吸水所引起的源汇项, $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^3)$

D_v ——土壤中的蒸汽扩散率, m^2/s

ζ ——增量因子

s_v ——饱和水汽压曲线的斜率, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$

D'_v ——蒸汽的扩散率

θ_a ——土壤中空气含量, m^3/m^3

b_v, c_v ——计算土壤孔隙弯曲度的系数, 分别取 0.66 和 1.0

式(9)中的各项分别代表: 液态水含量的变化量, 冰的变化量, 进入土壤层的液态水通量和蒸汽通量, 以及由作物根系吸水所引起的源汇项。

1.2 误差分析

(1) 均方根误差 (Root mean square error, RMSE) 用于反映蒸散量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。其计算式为

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - M_i)^2} \quad (12)$$

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) 用于反映蒸散量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。其计算式为

$$M_{BE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - M_i) \quad (13)$$

(3) 模型效率 (Model efficiency, ME) 用于表示模型的整体模拟效果, 与回归方程中的决定系数 (R^2) 类似, 不同的是取值范围为 $(-\infty \sim 1)$, 当 ME 越接近 1 时, 代表模型的模拟效果越好^[27]。其计算式为

$$M_E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M}_i)^2} \quad (14)$$

式中 \bar{M}_i ——实测平均值

1.3 试验区概况

试验数据来源于 2011—2012 年和 2012—2013 年冬季北京市小汤山精准农业示范基地的称重式蒸渗仪系统。试验区地理位置为 $116^\circ 26' 39'' \text{E}$, $40^\circ 10' 43'' \text{N}$, 属于大陆性季风气候, 2 年的平均降水量为 421 mm 左右, 2011—2012 年冬季最高温度为 3.68°C , 最低温度为 -9.78°C , 平均温度 -3.79°C ; 2012—2013 年冬季最高温度为 0.44°C , 最低温度为 -13.69°C , 平均温度 -5.24°C 。2 年冬季的温度和降水量数据如图 1 所示 (“土壤冻结期”指在该时间范围内空气温度低于 0°C , 土壤出现冻结, 下同)。可见在试验区内, 土壤进入冻结期后, 干旱少雨。试验区土壤质地组成等相关参数见表 1。

试验所用蒸渗仪数据为 24 套中型蒸渗仪 (长 1 m, 宽 0.75 m, 深 2.3 m; 如图 2 所示) 测量的平均值和标准差。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质量后, 使用质量传感器测量土壤中水分质量, 以反映土壤蒸发量的变化^[28]。传感器测量频率为每 15 min 一次, 灵敏度为 0.05 ~ 0.10 mm。本文对 24 组试验数据的平均值与模型估算值进行比较, 并对试验数据进行相关性分析, 结果显示: 在显著性水平 $\alpha = 0.001$ 的情况下, 组与组之间相关系数 $R (0.3392 < R < 0.9847, n = 163, n$ 为样本数量) 均大于临界值 $R_a = 0.3211 (n = 102, \alpha = 0.001)$, 即 24 组蒸渗仪的观测数据之间显著相关。其中, 有 21 组数据与其他组数据的相关系数较高 ($0.7227 < R < 0.9847$)。可见, 本研究使用的称重式蒸渗仪性能稳定、数据可靠、精度较高。此外, 蒸渗仪配备了气象站, 可获取太阳辐射、空气温度、相对湿度、风速、降水量等气象数据。

SHAW 模型的输入条件除气象条件外, 还包括土壤剖面的初始含水率和初始温度。在本试验中, 采用介电管式传感器测量土壤中的液态水含量, DS18B20 型温度传感器测量土壤温度^[29]。

2 结果与讨论

2.1 2011—2012 年越冬期蒸散模型修正前后数据对比

将气象数据代入 PM、PT、SHAW 模型分别计算地表蒸散量 (冬季只考虑土壤蒸发量), 结果如图 3 所示。从图中可以看出, 在越冬期土壤冻结时, PT

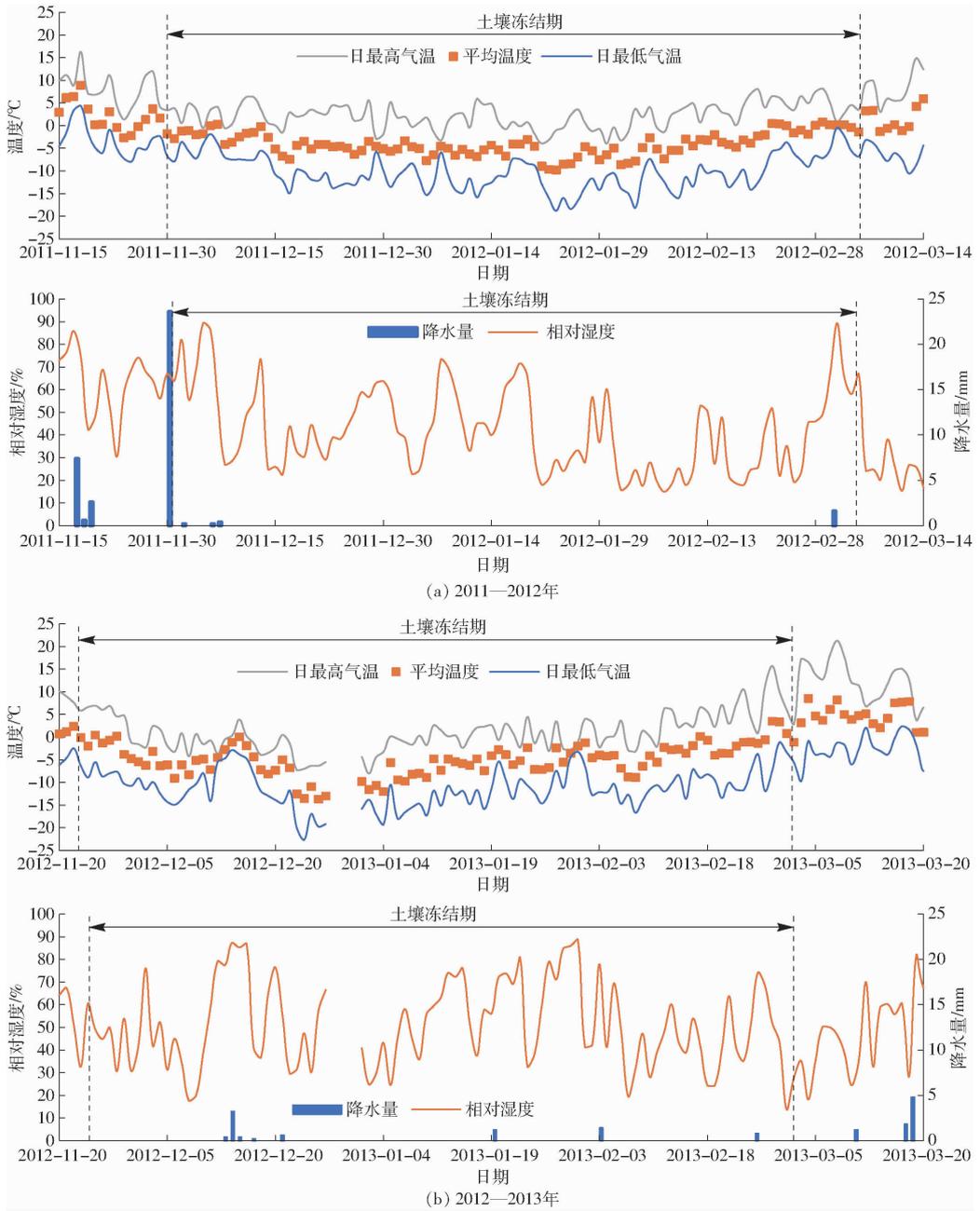


图 1 2011—2012 年和 2012—2013 年冬季空气温度、相对湿度和降水量

Fig. 1 Air temperature, relative humidity and precipitation in winters of 2011—2012 and 2012—2013

表 1 试验区土壤参数

Tab. 1 Soil parameters in experimental field

参数	数值
砂粒质量分数/%	39.9
粉粒质量分数/%	46.6
黏粒质量分数/%	13.5
容重 $\rho_b / (g \cdot cm^{-3})$	1.10
空气进入势 ψ_e / kPa	3
饱和含水率 $\theta_s / (m^3 \cdot m^{-3})$	0.41
空隙分布指数 b	4.20
饱和导水率 $K_s / (m \cdot h^{-1})$	0.01

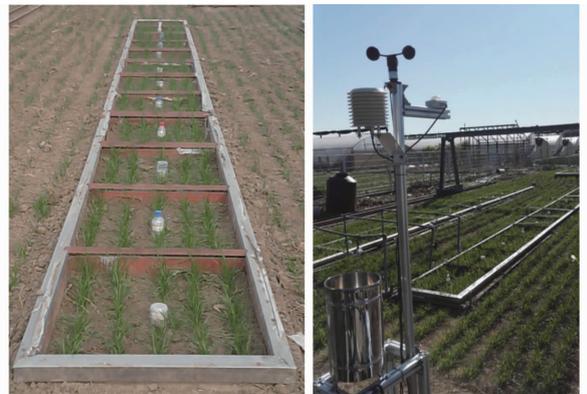


图 2 蒸渗仪测量系统

Fig. 2 Lysimeter measurement system

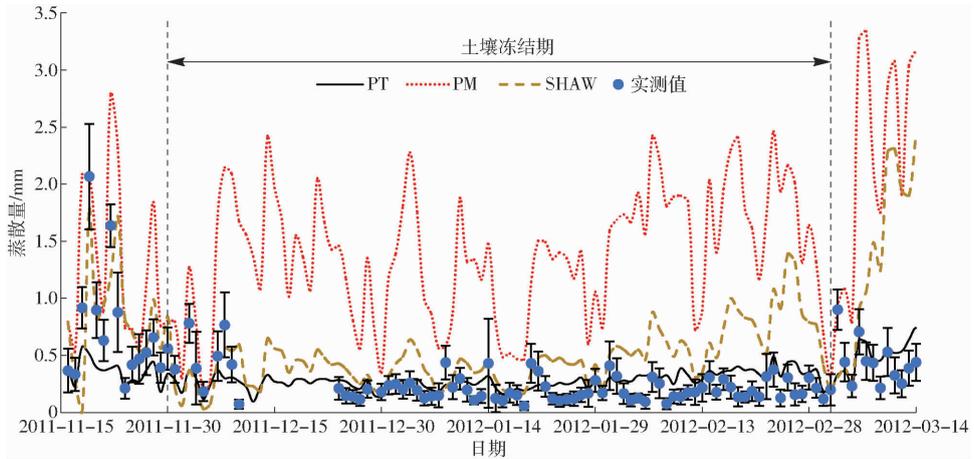


图3 2011—2012年越冬期蒸散模型修正前数据对比

Fig. 3 Comparison of evapotranspiration before revising model in wintertime of 2011—2012

模型和 SHAW 模型的计算结果与蒸渗仪的实测值较为接近,根据误差分析结果(表2)可得,PT 模型的 RMSE 最小,为 0.159 mm,SHAW 模型次之,PM 模型最大。根据 MBE 值,可以看出 3 个模型相对于越冬期地表蒸散量的实测值均高估,这是由于越冬期土壤温度降低,土壤中部分液态水冻结成冰,减少了液态水含量,降低了土壤的基质势,使土壤环境形成水分胁迫状态,导致实际蒸散量低于无水胁迫状态。为此,可引入水分胁迫系数 K_s ,减小土壤含水率对蒸散量估算值的影响,以提高模型精度。

表2 2011—2012年越冬期蒸散模型修正前后误差分析

Tab. 2 Analysis of error before and after revising model in wintertime of 2011—2012

蒸散模型	默认参数模型			修正参数模型		
	RMSE/	MBE/	ME	RMSE/	MBE/	ME
	mm	mm		mm	mm	
PM	0.697	0.594	-6.358	0.159	0.013	0.618
PT	0.159	0.045	0.619	0.130	-0.011	0.748
SHAW	0.390	0.256	-1.304	0.280	0.193	-0.195

本文利用蒸渗仪测得的蒸散量实测值与 PM、PT 模型得到的估算值进行比较,利用线性函数拟合

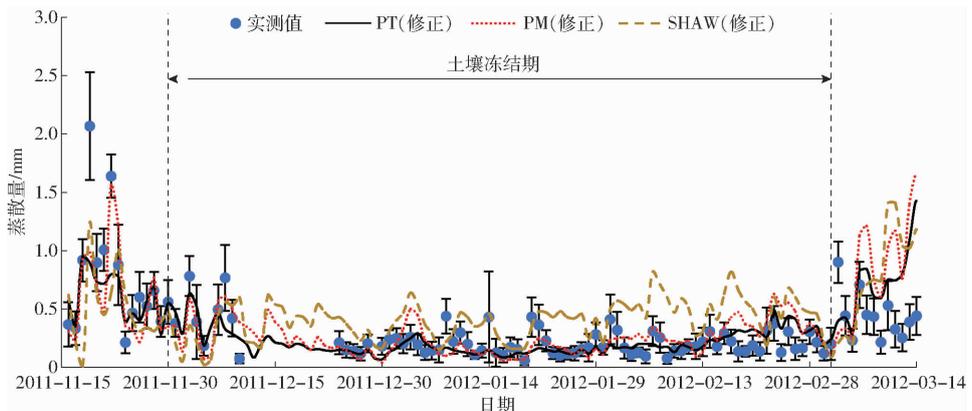


图4 2011—2012年越冬期蒸散模型修正后数据对比

Fig. 4 Comparison of evapotranspiration after revising model in wintertime of 2011—2012

出 K_s 与土壤液态水含量 θ 之间的关系(表3),使估算值的 RMSE 最小来优化参数。经过参数修正,PM 模型的 RMSE 由 0.697 mm 降至 0.159 mm,ME 由 -6.358 增加到 0.618,模型精度明显提高;在 3 个模型中 PT 模型的 RMSE 最小,为 0.130 mm,ME 最接近 1;SHAW 模型中的土壤反射率与蒸发量密切相关^[30],该参数增大时,误差相对减小,当调至最大值 0.5 时,RMSE 减小为 0.280 mm,但是由于 SHAW 软件的参数数值范围限制,不能继续优化数据以达到更好的修正效果(表2,图4)。3 种模型经过参数修正后的蒸发累积量与实测值相比,PT 模型的精度最高,SHAW 和 PM 模型的累积量均高估(图5)。

表3 越冬期蒸散模型修正前后参数

Tab. 3 Parameters of evapotranspiration model before and after revising in wintertime

蒸散模型	参数	默认参数值	修正参数值/公式
PM	K_s	1	$6.06\theta - 0.35$
PT	K_s	1	$16.86\theta - 0.55$
SHAW	反射率	0.15	0.50

通过误差对比发现,3 种模型使用默认或经验参数进行估算,PT 模型的估算精度最高。参数修正

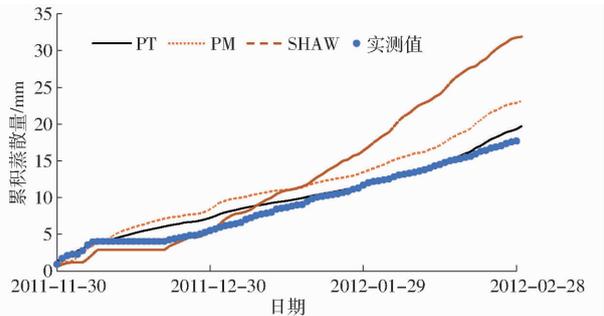


图 5 2011—2012 年修正蒸散模型越冬期累积蒸散量

Fig. 5 Cumulative evapotranspiration after revising model in wintertime of 2011—2012

后,3 种模型的估算精度都明显提高,且 PT 模型的估算精度仍然最高。PM 模型默认参数误差较大,不适用于土壤冻结期的蒸发量计算,参数修正后模型精度大幅提高,证明了在冬季土壤冻结期内使用 PM 模型时考虑水分胁迫影响的重要性。SHAW 模型的修正由于受到软件参数设定的限制,精度虽有

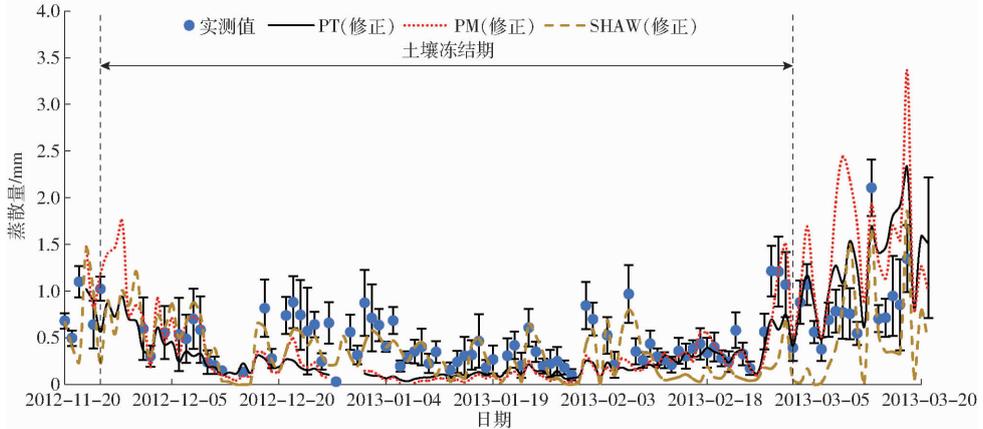


图 6 2012—2013 年越冬期蒸散模型修正后数据对比

Fig. 6 Comparison of evapotranspiration after revising model in wintertime of 2012—2013

表 4 2012—2013 年越冬期蒸散模型修正前后误差分析

Tab. 4 Analysis of error before and after revising evapotranspiration model in wintertime of 2012—2013

蒸散模型	默认参数模型			修正参数模型		
	RMSE/ mm	MBE/ mm	ME	RMSE/ mm	MBE/ mm	ME
PM	0.844	0.636	-9.085	0.252	-0.102	0.214
PT	0.263	-0.104	0.048	0.267	-0.150	0.117
SHAW	0.304	-0.175	-0.136	0.253	-0.053	0.206

参数修正后,PM 模型中考虑了土壤冻结时因液态水含量降低引起的水分胁迫对蒸散量估算的影响,大幅提高了模型估算精度。PT 模型的估算值受温度影响较大,这是由于在冻结土壤中,温度与液态水含量关系密切^[25]。在 2012—2013 年 12 月 17—25 日期间,PT 模型出现明显的低估,这可能是由于 12 月 13—17 日期间连续降雪(图 1b),而且日平均温度开始上升,覆盖在土壤表面的积雪部分融化,地

所提高,但是与 PT 模型相比还存在一定差距,SHAW 模型需要的参数繁多且复杂,实际计算难度较大,除了需要气象数据,还需要对土壤的相关参数进行测量,不仅提高了成本,而且测量过程中的误差也可能导致计算结果不准确。因此,为保证模型精度和降低成本,应当优先考虑使用 PT 模型。

2.2 2012—2013 年越冬期蒸散模型适用性检验

将 2011—2012 年蒸散模型参数修正结果用于 2012—2013 年的蒸散量估算,进行模型的适用性检验和评价。由图 6、表 4 可见,修正后的 3 个模型均能够较为精确地跟踪蒸散量的动态变化,其中 PM 模型的精确度最高, RMSE 为 0.252 mm, ME 为 0.214(表 4)。参数修正后 PT 模型和 SHAW 模型的精度均有所提高,但并不明显,而 PM 模型的误差大幅减小,模型精度明显提高, RMSE 由 0.844 mm 下降为 0.252 mm, ME 由 -9.085 上升至 0.214。

表蒸散量增加。

2 年的误差分析结果显示(表 2、4):使用默认模型参数估算越冬期地表蒸散量时,PT 模型的精度最高,且计算最为简便,所需气象数据和参数均最少,为最佳预测模型。在模型参数修正后,PM 模型精度明显提高,PM 模型不仅考虑了辐射和空气温度对蒸散量的影响,还包含了空气动力学因素的影响,如风速、相对湿度等,从而减小某一种因素的极端变化对结果的影响程度,使预测结果更稳定;PT 模型受温度等气象数据影响较大,但该模型所需数据少,计算简便,精度相对较高;SHAW 模型的精度稳定,但是需要大量的气象和冻土数据,且计算过程复杂。

3 结论

(1)在越冬期麦田地表蒸散量估算过程中,使用默认参数的各个模型的精度从低到高依次为

PM、SHAW、PT, 其 RMSE 分别为 0.697、0.390、0.159 mm。PT 和 SHAW 模型适用于冬季地表蒸发量的预测。由于冬季地表冻结使液态水含量降低, 土壤出现水分胁迫, 从而导致 PM 模型精度较低, 不适用于冬季地表蒸散量的预测。

(2) 考虑到土壤冻结与未冻土壤脱湿过程的相似性, 引入水分胁迫系数对 PM 模型进行参数修正。修正后, 模型精度明显提高, RMSE 由 0.697 mm 降至 0.159 mm, 模型效率由 -6.358 提高至 0.618。

相比之下, PT 模型的预测精度相对最高, 所需数据量少且计算简便, 但是受空气温度等气象因素影响较大。SHAW 模型本身即为冻融条件下模拟土壤水热、能量等运移的模型, 精度相对较高。

(3) 使用 2012—2013 年的数据进行模型验证, 参数修正后 3 个模型精度均有所提高, 且精度相差不大, PM 模型精度最高。但是由于 SHAW 模型的复杂性以及 PM 模型对数据的高要求, 建议计算越冬期地表蒸散量时, 优先使用 PT 模型。

参 考 文 献

- 1 吴文玉, 孔芹芹, 王晓东, 等. 安徽省近 40 年参考作物蒸散量的敏感性分析[J]. 生态环境学报, 2013, 22(7): 1160 - 1166.
WU Wenyu, KONG Qinqin, WANG Xiaodong, et al. Sensitivity analysis of reference crop evapotranspiration in Anhui province in the recent 40 years [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(7): 1160 - 1166. (in Chinese)
- 2 刘园, 王颖, 杨晓光. 华北平原参考作物蒸散量变化特征及气候影响因素[J]. 生态学报, 2010, 30(4): 923 - 932.
LIU Yuan, WANG Ying, YANG Xiaoguang. Trends in reference crop evapotranspiration and possible climatic factors in the North China Plain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(4): 923 - 932. (in Chinese)
- 3 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.
- 4 ZHANG M, ZHI W, KE X, 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.
- 5 白玲晓, 王勇, 李兴. 作物蒸散量测定与计算方法研究进展[J]. 内蒙古水利, 2015(2): 11 - 12.
- 6 黄子琛, 蒲锦春, 高征锐. 河西地区农作物的蒸发蒸腾试验研究——临泽北部绿洲春小麦和玉米的蒸发蒸腾量[J]. 中国沙漠, 1988, 8(2): 54 - 64.
HUANG Zichen, PU Jinchun, GAO Zhengrui, et al. The study on the crop evapotranspiration in the Hexi region—the evapotranspiration of spring wheat and maize in the northern part of the Linze oasis [J]. Journal of Desert Research, 1988, 8(2): 54 - 64. (in Chinese)
- 7 徐俊增, 彭世彰, 丁加丽, 等. 基于蒸渗仪实测数据的日参考作物蒸发腾量计算方法评价[J]. 水利学报, 2010, 41(12): 1497 - 1505.
XU Junzeng, PENG Shizhang, DING Jiali, et al. Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration based on lysimeter grass experiments [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(12): 1497 - 1505. (in Chinese)
- 8 袁小环, 杨学军, 陈超, 等. 基于蒸渗仪实测的参考作物蒸散发模型北京地区适用性评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(13): 104 - 110.
YUAN Xiaohuan, YANG Xuejun, CHEN Chao, et al. Applicability assessment of reference evapotranspiration models in Beijing based on lysimeter measurement [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(13): 104 - 110. (in Chinese)
- 9 杨炳玉, 申双和, 张富存, 等. 不同尺寸蒸渗仪测定作物蒸散的田间试验研究[J]. 中国农业气象, 2015, 36(2): 161 - 169.
YANG Bingyu, SHEN Shuanghe, ZHANG Fucun, et al. Field experiment on crop evapotranspiration measurements via lysimeters with different scales [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2015, 36(2): 161 - 169. (in Chinese)
- 10 LIU X, LIN E. Performance of the Priestley - Taylor equation in the semiarid climate of North China [J]. Agricultural Water Management, 2005, 71(1): 1 - 17.
- 11 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.
- 12 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 Mingan. 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)
- 13 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)

- 14 ALLAN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration; guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper No. 56[C]. FAO, 2005.
- 15 李菲菲, 饶良懿, 吕琨珑, 等. Priestley - Taylor 模型参数修正及在蒸散发估算中的应用[J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30(5):748 - 754.
LI Feifei, RAO Liangyi, LÜ Kunlong, et al. Parameter corrections for the Priestley - Taylor model and applications in evapotranspiration estimation [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2013, 30(5):748 - 754. (in Chinese)
- 16 张文毅, 党进谦, 赵璐. Penman - Monteith 公式与 Penman 修正式在计算 ET_0 中的比较研究[J]. 节水灌溉, 2010(12):54 - 59.
ZHANG Wenyi, DANG Jinqian, ZHAO Lu. Comparison of ET_0 estimated by Penman - Monteith and modified Penman methods [J]. Water Saving Irrigation, 2010(12):54 - 59. (in Chinese)
- 17 宋妮, 孙景生, 王景雷, 等. 基于 Penman 修正式和 Penman - Monteith 公式的作物系数差异分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19):88 - 97.
SONG Ni, SUN Jingsheng, WANG Jinglei, et al. Analysis of difference in crop coefficients based on modified Penman and Penman - Monteith equations[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(19):88 - 97. (in Chinese)
- 18 胡顺军, 潘渝, 康绍忠, 等. Penman - Monteith 与 Penman 修正式计算塔里木盆地参考作物潜在腾发量比较[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6):30 - 35.
HU Shunjun, PAN Yu, KANG Shaozhong, et al. Comparison of the reference crop evapotranspiration estimated by the Penman - Monteith and Penman methods in Tarim River Basin [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(6):30 - 35. (in Chinese)
- 19 赵玲玲, 王中根, 夏军, 等. Priestley - Taylor 公式的改进及其在互补蒸散模型中的应用[J]. 地理科学进展, 2011, 30(7):805 - 810.
ZHAO Lingling, WANG Zhonggen, XIA Jun, et al. Improved Priestley - Taylor method and its application in complementary relationship evapotranspiration model [J]. Progress in Geography, 2011, 30(7):805 - 810. (in Chinese)
- 20 XU C Y, SINGH V P. Evaluation of three complementary relationship evapotranspiration models by water balance approach to estimate actual regional evapotranspiration in different climatic regions[J]. Journal of Hydrology, 2005, 308(1 - 4):105 - 121.
- 21 梁文清. 冬小麦、夏玉米蒸发蒸腾及作物系数的研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2012.
LIANG Wenqing. Calculation of crop water consumption and determination of underground water replenishment under deficit irrigation [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012. (in Chinese)
- 22 张振华, 蔡焕杰, 杨润亚. 水分胁迫条件下膜下滴灌作物蒸发蒸腾量计算模式的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(5):148 - 151.
ZHANG Zhenhua, CAI Huanjie, YANG Runya. Evapotranspiration estimation model for film-mulched and drip-irrigated crop under water stress condition [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(5):148 - 151. (in Chinese)
- 23 KOOPMANS R W R, MILLER R D. Soil freezing and soil water characteristic curves[J]. Soil Science Society of America Journal, 1966, 30(6):680 - 685.
- 24 黄梦琪. 水分亏缺条件下作物需水量的计算及地下水补给量的确定[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2007.
HUANG Mengqi. Study on measuring crop evapotranspiration and crop coefficients changes for winter wheat and maize [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2007. (in Chinese)
- 25 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(78):133 - 138.
- 26 FLERCHINGER G N, PIERSON F B. Modeling plant canopy effects on variability of soil temperature and water[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 1991, 56(3 - 4):227 - 246.
- 27 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 & Forest Meteorology, 2014, 194(194):218 - 229.
- 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 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.
- 30 FLERCHINGER G N, CALDWELL T G, CHO J, et al. Simultaneous heat and water (SHAW) model: model use, calibration, and validation[J]. Transactions of the ASABE, 2012, 55(4):1395 - 1411.