

基于贝叶斯分析的干热河谷区橙子林冠层蒸腾耗水模拟

张晶莹¹ 陈滇豫¹ 马永胜² 胡笑涛¹ 杜敬斌² 王书剑¹

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;
2. 延安市果业研究发展中心, 洛川 727400)

摘要: 需耗水机制是进行农田/果园水分管理和调控的基础。本文聚焦蒸腾耗水机制, 基于贝叶斯参数估计方法对比了不同 Jarvis - Stewart 模型配置对干热河谷区橙子林蒸腾耗水量的模拟效果, 探索了 Jarvis - Stewart 模型在影响因子交互效应较强条件下蒸腾耗水模拟中的适用性。结果表明, 考虑不同影响因子及其限制函数会对模拟效果产生较大影响, 其中考虑土壤含水率和叶面积指数对模拟效果改善作用明显, 而引入饱和水汽压差和气温则不同程度地降低模拟精度; 考虑的影响因子越多, 模型结构越复杂, 模拟效果不一定越好; 筛选出的最佳模型结构基本实现了橙子林蒸腾耗水的可靠模拟, 但模拟效果仍有明显改进空间, 因此, 应综合考虑模型复杂程度、模拟精度及不确定性等, 进一步探究适宜的模型结构。研究可为果园节水灌溉技术体系建立和水分管理优化提供科学依据, 也能为耗水模型的进一步发展和完善提供理论支撑。

关键词: 橙子林; 蒸腾耗水模拟; 干热河谷; Jarvis - Stewart 模型; 贝叶斯参数估计

中图分类号: S666.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298 (2024) 01-0305-11

OSID:



Canopy Transpiration Water Consumption Simulation of Orange Forest in Dry and Hot Valley Area Based on Bayesian Analysis

ZHANG Jingying¹ CHEN Dianyu¹ MA Yongsheng² HU Xiaotao¹ DU Jingbin² WANG Shujian¹

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Yan'an Fruit Industry Research and Development Center, Luochuan 727400, China)

Abstract: The mechanism of water consumption is the basis for management and regulation of water in farmland/orchards. Focusing on the transpiration mechanism of water consumption, the simulation effect of different Jarvis - Stewart model configurations on transpiration consumption in orange forests in dry and hot valleys was compared based on Bayesian parameter estimation methods, and the applicability of Jarvis - Stewart model in the simulation of transpiration water consumption under the condition of strong interaction effect of influence factors was explored. The results showed that considering different influencing factors and their limiting functions would have a great impact on the simulation effect, among which considering soil moisture content and leaf area index had obvious effects on the improvement of the simulation effect, while the introduction of saturated water vapor pressure difference and air temperature would reduce the simulation accuracy to varying degrees. The more impact factors considered, the more complex the model structure was, and the better the simulation effect was. The best model structure screened out basically realized the reliable simulation of water consumption of transpiration in orange forest, but there was still obvious room for improvement in the simulation effect, so the model complexity, simulation accuracy and uncertainty should be comprehensively considered to further explore the appropriate model structure. The research can provide scientific basis for the establishment of water-saving irrigation technology system and water management optimization in orchards, and also provide data support for the further development and improvement of water consumption models.

Key words: orange forest; transpiration water consumption simulation; dry and hot valley area; Jarvis - Stewart model; Bayesian parameter estimation

收稿日期: 2023 - 05 - 07 修回日期: 2023 - 06 - 22

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (51909232) 和中国博士后基金面上项目 (2019M663588)

作者简介: 张晶莹 (2001—), 女, 硕士生, 主要从事耗水模拟及调控研究, E-mail: 1773484622@qq.com

通信作者: 陈滇豫 (1989—), 女, 副教授, 博士, 主要从事农业节水理论研究, E-mail: 875948920@qq.com

0 引言

Jarvis - Stewart 模型(J - S 模型)是一种典型的蒸腾耗水模拟方法^[1],在长时间序列的耗水模拟中应用广泛,经验证模拟效果得到普遍公认。例如,WHITLEY 等^[2]比较了 Penman - Monteith (P - M)^[3-5]和 J - S 模型估算澳大利亚原生森林的日蒸腾耗水量 T_e 的模拟效果,发现两种模型在夏季都表现良好,但 P - M 模型在冬季日蒸腾耗水量高时模拟效果不够理想。韩磊等^[6]以宁夏河东沙区侧柏为对象,利用 P - M 方程计算获得日尺度上的冠层导度,同时采用 J - S 模型对侧柏冠层导度变化过程进行模拟,取得良好的模拟效果,实测值和模拟值的决定系数 R^2 高达 0.84。LI 等^[7]比较了多元线性回归模型(MLR)和 J - S 模型估算中国黑河流域沙漠河岸森林的日尺度蒸腾耗水量的模拟效果,结果表明,与 MLR 模型相比,J - S 模型模拟效果更好。XU 等^[8]评估了 J - S 模型估算中国临泽内河流域 3 种沙漠灌木日蒸腾耗水量的适用性,表明 J - S 模型的效果比简化的基于过程的模型(MLR 模型)更为显著。GUYOT 等^[9]发现,当结合不同土壤深度的含水率数据时,通过 J - S 模型可以获得更好的针叶林蒸腾耗水量模拟结果。这些研究充分肯定了 J - S 模型在蒸腾耗水模拟中的重要贡献,但 J - S 模型是阶乘模型,其假设各个影响因子对蒸腾耗水的影响相互独立,即忽略了各个影响因子之间的交互作用。目前这种方法多用于气候温和地区,或单一环境胁迫条件下,由于此类地区环境因子交互效应较弱,满足 J - S 模型基本假设,故模拟效果较好。但该模型对在影响因子交互作用比较强烈地区的适用性研究较为缺乏,影响因子独立性假设在这类地区蒸腾耗水模拟中影响程度至今依然没有明确结论。

此外,由于 J - S 模型涉及各类影响因素的全面考量,内嵌较多待定参数,其取值难以通过传统的实测手段获取,使得模拟结果存在较大不确定性。而贝叶斯分析将实测信息、模型参数间的相互影响及参数波动范围和不确定性的相关假设相结合,通过高频次抽样迭代反演参数后验分布,具有强大的模型参数推断能力,并且能够量化表征模型输出结果的不确定性,因此在模型参数优化和不确定性分析领域具有广泛的影响力^[10-11]。位于我国西南的干热河谷地区气候条件特殊,干旱与高温并存,属于世界统一划分的三大类干旱地区之一。在旱季末期的干热季节,与水分、温度和辐射相关的多重环境胁迫及其交互效应共同作用,使得植物耗水机制复杂,故该区具备研究多重环境胁迫及影响因子交互效应的

绝佳条件。因此,本研究选择干热河谷区作为研究区,以该区典型经济林橙子林为研究对象,基于贝叶斯分析探究 J - S 模型在影响因子交互效应较强条件下蒸腾耗水模拟中的适用性,为该区特色经济林节水灌溉技术体系建立和灌溉制度优化提供科学依据和理论支撑,以保障大规模橙子种植园的健康、稳定和可持续发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验布设于云南省玉溪市新平县戛洒镇的元江干热河谷水土保持生态站(24°03'N,101°35'E),该区多年平均降雨量为 800 ~ 1 100 mm,且主要集中在 5—10 月;多年平均气温为 19 ~ 23℃^[12]。土壤为典型燥红壤,pH 值均值为 6.1。该地区田间持水率为 25.8%,凋萎系数为 9.2%。本研究以元江干热河谷区大面积种植的典型人工经济林橙子林为研究对象,品种为甜橙(*Citrus sinensis* (L.) Osbeck),在 8 年生橙子林里随机选取橙子树 7 株(株行距为 2 m × 3 m)作为重复进行数据监测。

1.2 监测指标与数据采集

1.2.1 冠层蒸腾量

在 2020 年 6 月到 2021 年 5 月生育期,采用热扩散探针法(TDP)测量所选的 7 株橙子树的树干液流,为了减小对树体的伤害,每株树上只在树干北侧离地面 50 cm 高度处安装一组探头,采用 CR1000 型数据采集器每 15 min 记录一次瞬时液流数据,用于实时冠层蒸腾量推算。根据能量守恒原理,利用探针间的温度差计算液流通量密度^[13],计算式为

$$U = 0.714 \left(\frac{\Delta T_{\max} - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231} \tag{1}$$

式中 U ——液流通量密度, $\text{mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$
 ΔT ——加热探针与非加热探针之间的温度差,℃
 $\Delta T_{\max}$ ——零液流时加热探针与非加热探针之间的温差,即最大温差,℃
然后将其转换为单位地面蒸腾量^[13],公式为

$$T_m = KU \frac{A_s}{A_g} \tag{2}$$

式中 A_s ——边材面积, cm^2
 A_g ——平摊到每棵树的地面面积,按种植密度计算,为株行距乘积($2 \times 3 = 6 \text{ m}^2$)
 K ——单位换算系数,取 3.6
 T_m ——橙子林单位地面蒸腾量(将树体蒸腾量平摊到每棵树的地面面积), mm/d

1.2.2 叶面积指数

2020 年 6 月到 2021 年 5 月生育期内定期用 CI-110 型植物冠层数字图像分析仪测定橙子树叶面积指数(LAI)动态散点,约每 15 d 测定 1 次,然后运用生长函数对这些散点进行拟合,根据拟合出的公式估算橙子林逐日 LAI 数据。拟合公式为

2020 年
$$LAI = 4.64 - \frac{1.875}{1 + \left(\frac{DOY}{130.776}\right)^{4.345}} \quad (3)$$

2021 年
$$LAI = 4.723 - \frac{2.033}{1 + \left(\frac{DOY}{119.236}\right)^{3.3303}} \quad (4)$$

式中 DOY——日序

1.2.3 土壤指标

在橙子林随机选取 3 个冠层正下方及 3 个冠层外位点各埋设一组时域反射仪(TDR)土壤水热监测系统,步长为 20 cm,监测 0~1 m 土层内的土壤含水率;同样采用 CR1000 型数据采集器每 15 min 记录 1 次数据。

1.2.4 气象要素

采用自动气象站监测步长 15 min 气象数据,测量指标包括降雨量(P ,mm)、总辐射(R_s ,W/m²)、净辐射(R_n ,W/m²)、光合有效辐射(PAR,W/m²)、相对湿度(RH,%)、气温(T ,℃)和风速(u ,m/s)。饱和水汽压差(VPD,kPa)基于气温 T 和 RH 采用 FAO-56 推荐的方法进行计算,计算式为

$$VPD = e_s - e_a \quad (5)$$

其中
$$e_s = \frac{e_0(T_{\max}) + e_0(T_{\min})}{2} \quad (6)$$

$$e_0(T_{\min}) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T_{\min}}{T_{\min} + 237.3}\right) \quad (7)$$

$$e_0(T_{\max}) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T_{\max}}{T_{\max} + 237.3}\right) \quad (8)$$

$$e_a = e_s \frac{RH_{\text{mean}}}{100} \quad (9)$$

式中 $T_{\max}$ ——日平均最高温度,℃
 $T_{\min}$ ——日平均最低温度,℃
 RH_{mean} ——日平均相对湿度, %
 e_s ——饱和水汽压,kPa
 e_a ——实际水汽压,kPa
 $e_0(T)$ ——空气温度 T 时的水汽压,kPa

1.3 蒸腾耗水模拟与参数优化

采用经典的 J-S 连乘模型模拟橙子林冠层蒸腾耗水量,将蒸腾耗水可能的重要影响因子依次耦合入 J-S 模型中,同一个影响因子的限制函数(环境因子对蒸腾耗水的胁迫函数,取值范围 0~1 之间)具有多种常用表达式,通过对连乘影响因子数

量及影响因子限制函数表达式的组合,构建多种具有不同复杂程度的 J-S 模型结构。采用贝叶斯方法率定每一个模型的参数并检验模拟效果,通过多模型比较得出使蒸腾耗水量模拟效果最优的连乘因子及限制函数表达式组合方式,最后综合考虑模拟精度、不确定性和模型结构复杂程度进行最佳模型结构筛选。

J-S 模型基本表达式为^[14]

$$T_e = E_{\max} f_1(PAR) f_2(VPD) f_3(\theta) f_4(T) f_5(LAI) \quad (10)$$

式中 $E_{\max}$ ——橙子树日蒸腾耗水量最大值

$f_1(PAR)$ ——PAR 的限制函数

$f_2(VPD)$ ——VPD 的限制函数

$f_3(\theta)$ ——土壤含水率 θ 的限制函数

$f_4(T)$ ——气温 T 的限制函数

$f_5(LAI)$ ——LAI 的限制函数

本研究将 $E_{\max}$ 作为模型共同部分,阶乘部分考虑 LAI 和环境影响因子,环境影响因子从饱和水汽压差、光合有效辐射、气温和土壤含水率中选取一个或多个。由于影响因子的限制函数具有多种表达式,本研究总结出以上 4 种影响因子的常用表达式及相关参数于表 1(VPD、PAR 和 θ 有 3 种限制函数表达式,LAI 和 T 有 2 种限制函数表达式)。这些限制函数形式在许多相关研究中被广泛采用^[10,15-21]。为简化模型表述,本研究采用字母结合数字下标指代模型,字母和数字与所选取的环境因子及限制函数相——对应,V、R、T 和 W 分别表示 VPD、PAR、 T 和 θ ,数字 1、2、3 分别表示第 1、第 2 和第 3 种限制函数形式。对于同一个环境因子,每个模型只采用其中一种限制函数形式,当某一环境因子和某些限制函数在模型中没有使用时,表示它们的字母和数字不会出现在模型符号中。比如,V1R2W3 表示 VPD、PAR 和 θ 在 J-S 模型中被考虑,使用 VPD 的第 1 种限制函数表达式、PAR 的第 2 种限制函数表达式和 θ 的第 3 种限制函数表达式。由于模型结构、参数和复杂程度的不同会导致模型蒸腾耗水模拟效果不同,本研究采用贝叶斯方法对不同的 J-S 模型结构进行参数率定,参照 WANG 等^[22]的方法将茎流计实测的蒸腾数据分成独立的 2 组,一组用于参数率定(2020 年 6 月—2021 年 5 月日序为奇数部分数据),另外一组用于模型检验(2020 年 6 月—2021 年 5 月日序为偶数部分数据)。

1.4 贝叶斯参数优化理论

贝叶斯分析是一种全局参数优化方法,将未知参数看作随机变量,通过一系列的已知实测数据和参数的先验概率信息,将反推问题与前推问题相关

表 1 所采用的影响因子常用限制函数与相关参数
Tab.1 Commonly used limit functions and related parameters corresponding to impact factors adopted

影响因子	符号	限制函数	参数
叶面积指数	L1	$\frac{LAI}{LAI_{\max}} \frac{LAI_{\max} + k}{LAI + k}$	k
	L2	$\frac{LAI}{LAI_{\max}}$	
饱和水汽压差	V1	$\exp(-k_1 VPD)$	k_1
	V2	$1 - k_2 VPD$	k_2
	V3	$\frac{1}{1 + k_3 VPD}$	k_3
光合有效辐射	R1	$\frac{PAR}{1\ 100} \frac{1\ 100 + A}{PAR + A}$	A
	R2	$\frac{PAR}{PAR + B}$	B
	R3	$1 - \exp\left(-\frac{PAR}{B_2}\right)$	B_2
气温	T1	$\frac{T - T_L}{T_{opt} - T_L} \left(\frac{T_H - T}{T_H - T_{opt}} \right)^{\frac{T_H - T_{opt}}{T_{opt} - T_L}}$	$T_H、T_L、T_{opt}$
	T2	$1 - a_2(a_3 - T)^2$	$a_2、a_3$
土壤含水率	W1	$\begin{cases} 1 & (\theta \geq \theta_{cr}) \\ \frac{\theta - \theta_w}{\theta_{cr} - \theta_w} & (\theta_w < \theta < \theta_{cr}) \\ 0 & (\theta \leq \theta_w) \end{cases}$	θ_{cr}
	W2	$\min\left(1, m_1 \left(1 - \exp\left(-m_2 \frac{\bar{\theta} - \theta_w}{\theta_F - \theta_w}\right)\right)\right)$	$m_1、m_2$
	W3	$\begin{cases} 1 & (SMD \leq s) \\ \frac{f_0 - 1}{1 - s} SMD + \frac{1 - sf_0}{1 - s} & (SMD > s) \end{cases}$	$s、f_0$

注： θ_w 为凋萎系数，取 9.2%； θ_F 为田间持水率，取 25.8%； SMD 为土壤亏缺度，计算式为 $(\theta_{\max} - \theta)/(\theta_{\max} - \theta_{\min})$ ，其中 $\theta_{\max}$ 和 $\theta_{\min}$ 分别为根区最大含水率和最小含水率^[17]。

联。根据参数取值范围设定变化步长，通过多参数同步在给定区间内高频次抽样，代入目标函数寻求最优解，不断反演得到未知参数的后验分布^[11]。

关于本研究涉及的所有蒸腾耗水模型，每个影响因子的限制函数参数($k、k_1、k_2、k_3、A、B、B_2、T_L、T_H、T_{opt}、a_2、a_3、\theta_{cr}、m_1、m_2、s、f_0$)从表 1 选取，形成各个蒸腾耗水模型的参数向量 β ，对未知参数进行推导，然后再进行模型检验和适用性评价。假设模型误差(模拟值 S 和实测值 O 的差)独立，服从方差(σ^2)为未知常数的正态分布，均值为零^[23-24]。包含 n 个观测值的实测数列 O 的似然函数表达式为^[11]

$$P(O|\beta,\sigma^2) \propto \sigma^{-n} \prod_{i=1}^n \exp\left(-\frac{(O_i - S(x_i,\beta))^2}{2\sigma^2}\right)$$

(11)

式中 O_i ——第 i 个蒸散实测值
 x_i ——模型输入向量
 $S(x_i,\beta)$ ——参数向量 β 下模型模拟输出值

σ ——模型误差的标准差

后验分布抽样采用基于 Gibbs 抽样的马尔科夫-蒙特卡罗 (Markov Chain Monte Carlo, MCMC) 方法^[25]，经过高频次抽样迭代获取模型参数的后验分布，该过程采用 WinBUGS 软件 (Windows version of Bayesian Updating using Gibbs Sampler) 实现^[26]。对各模型分别运行 3 条平行的 MCMC 链，并对其进行 100 000 次迭代反演，MCMC 链的收敛性通过迭代轨迹、BGR 诊断以及自相关函数判断，视觉判断迭代轨迹和迭代历史基本趋于稳定、BGR 诊断潜在规模缩小因子小于 1.2 以及自相关函数迅速归零说明 MCMC 链收敛^[27-28]。

1.5 模型模拟评价指标

采用平均相对误差 (MRE, %)、决定系数 R^2 、威尔莫特一致性指数 D 和不确定性区间平均宽度 B 评价 J-S 模型模拟的可靠性。计算公式为^[14, 29-30]

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - O_i| + |O_i - O|)^2}$$

(12)

$$B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{iu} - P_{il})$$

(13)

式中 P_i ——第 i 个蒸腾模拟值，mm/d
 N ——数据数量
 P_{iu} ——第 i 个蒸腾实测值对应的模型不确定性区间的上边界值，mm/d
 P_{il} ——第 i 个蒸腾实测值对应的模型不确定性区间的下边界值，mm/d

2 结果与分析

2.1 环境因子与蒸腾耗水日动态

2020 年 6 月—2021 年 5 月生育期环境条件及蒸腾耗水日动态见图 1。试验期气温呈先下降后上升趋势，气温在 2021 年 1 月 13 日达到最低温，为 4.86℃，在 2020 年 6 月 5 日达到最高温，为 46.79℃。在 2020 年 6 月—2021 年 5 月生育期内，全年降雨量为 795.6 mm，由于干热河谷地区地形、气候等条件较为特殊，全年分为 3 个季节，6 月到 10 月为雨季，11 月到 2 月为干季，3 月到 5 月为干热季，因此在 2020 年 6—10 月即雨季期间降雨量最高，干热季其次，干季降雨量最低，使得在雨季土壤含水率 θ 高于其他两个季节。在试验期内，土壤含水率 θ 全年平均值为 19.97%，土壤含水率 θ 大致随着降雨量变化而波动，总体情况在前期稍高于后期。

在 2020 年 6 月—2021 年 5 月生育期内，光合有效辐射和饱和水汽压差总体趋势大致相同，在试验

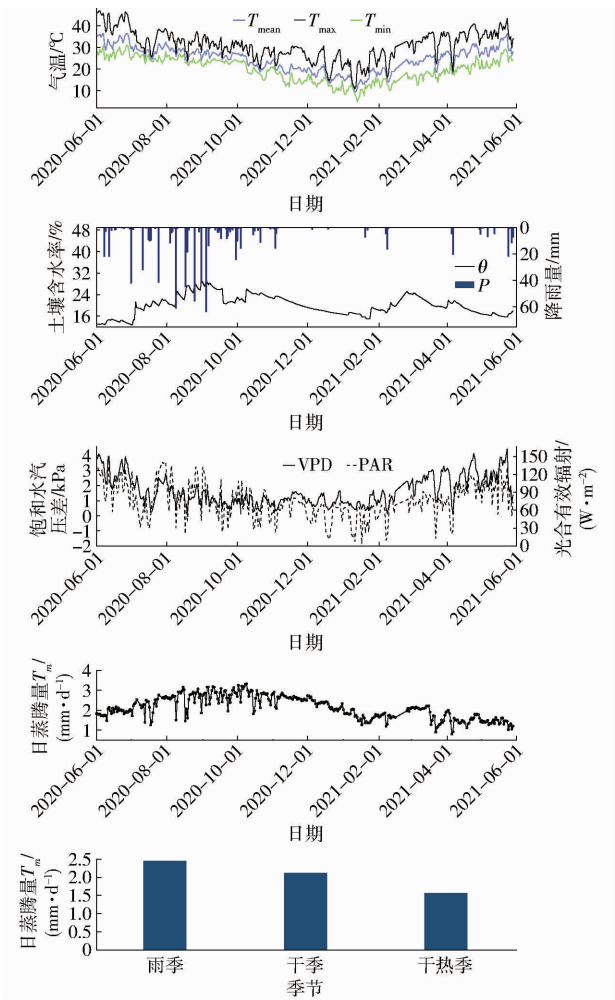


图 1 2020 年 6 月—2021 年 5 月生育期内气温、土壤含水率、饱和水汽压差、日蒸腾量动态变化

Fig. 1 Evolution of temperature, soil moisture content, saturation vapor pressure difference and daily transpiration during growth period from June 2020 to May 2021

期内二者均有波动,但总体趋势都呈先下降后上升,但光合有效辐射前期稍高于后期,而饱和水汽压差则后期稍高于前期,二者峰值均在 2021 年 1 月到 2 月之间。光合有效辐射在生育期内日平均值为 74.75 W/m^2 , 饱和水汽压差波动范围在 $0.11 \sim 5.26\text{ kPa}$ 之间。

在 2020 年 6 月—2021 年 5 月生育期内,日蒸腾量前期稍高于后期,在生育期内平均值为 2.13 mm/d ,

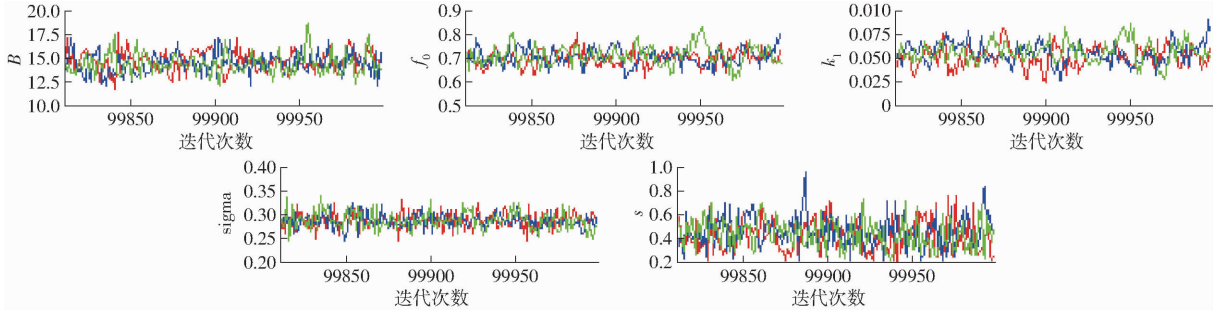


图 2 V1R2W3 模型参数 MCMC 链收敛情况

Fig. 2 Traces of sampled parameter values in MCMC chains for V1R2W3 model

其中虽然有波动,但总体趋势先上升后下降。在此期间,雨季、干季、干热季 3 个季节的日蒸腾量平均值分别为 2.45 、 2.12 、 1.56 mm/d ,比较得知在试验期内雨季蒸腾耗水量较高,干季其次,干热季蒸腾耗水量最低。

2.2 模型参数率定结果

图 2 为模型 V1R2W3 的迭代历史,表示 MCMC 链收敛情况,可以看出虽然模型 V1R2W3 的 3 条 MCMC 链起始情况不一致,但随着迭代次数的增加, MCMC 链逐渐一致即收敛。图 3 为模型 V1R2W3 的后验分布图,由图可得,后验分布明显比先验分布更为集中,表示运行 MCMC 链后,模型率定取得显著成果。

2.3 蒸腾耗水模拟效果

2.3.1 模型对比

表 2 为基于贝叶斯参数估计方法的多种蒸腾耗水模型的模拟效果,对比了率定及检验数据的平均相对误差、决定系数和威尔莫特一致性指数 3 个指标。根据计算,在 LAI 的两种限制函数中,第 2 种较第 1 种拟合效果更好且不需要额外率定参数,故后续选择第 1 种限制函数表达式与环境影响因子进行组合。由表 2 可以看出,从影响因子组合模拟效果来看,单一影响因子整体模拟效果不理想,加入 LAI 限制函数之后,模拟效果整体提高,例如 W1 模型,加入 LAI 的限制函数之后,其中率定部分数据 R^2 由 0.2607 提高到 0.5366 ,提高 0.2759 ; MRE 由 39.6354% 降低到 27.4654% ,降低 12.17 个百分点; D 由 0.5545 提高到 0.6645 ,提高 0.11 ; 还有 W3 模型,加入 LAI 的限制函数之后,其中率定部分数据 R^2 由 0.306 提高到 0.5366 ,提高 0.2306 ; MRE 由 33.6887% 降低到 24.2953% ,降低 9.3934 个百分点; D 由 0.5772 提高到 0.665 ,提高 0.0878 。故之后的模型中全部加入 LAI 的限制函数以提高模拟精度。在所有单因子组合中,土壤含水率的限制函数模拟效果最好,加入 LAI 限制函数的单因子模型中,模拟效果最好的为 W3 + LAI 组合, R^2 为 0.5144 ,

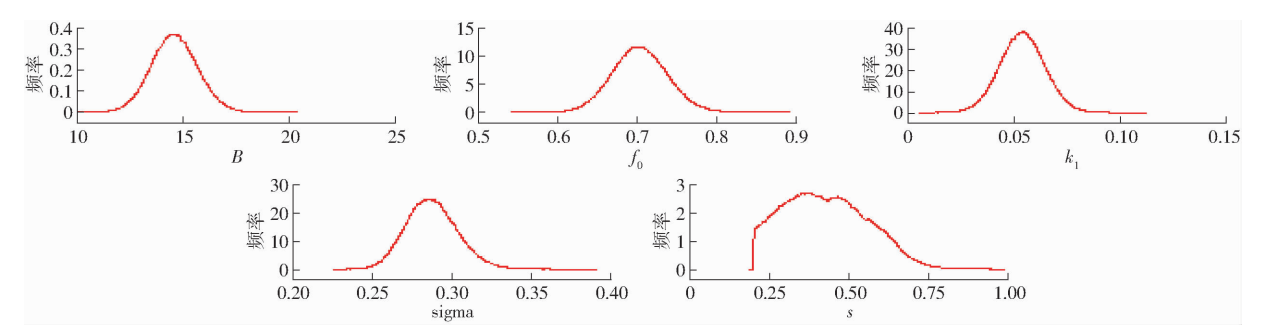


图 3 V1R2W3 模型参数后验分布

Fig. 3 Posterior density of sampled parameter values for V1R2W3 model

MRE 为 24.508 75%, D 为 0.659 9,可见土壤含水率是该区橙子林蒸腾耗水的主控影响因子。

在 3 个影响因子组合模拟效果对比时,使用了两组进行比较,一种是包含土壤含水率 θ 的 9 种正交表组合,一种是不包含土壤含水率 θ 的另外 3 个影响因子组成的 9 种正交表组合。计算得出包含土壤含水率的组合模拟效果整体较好,其中 V1R2W3 模型模拟效果最好,率定 R^2 为 0.761 5,MRE 为 10.574 7%, D 为 0.881 5;检验 R^2 为 6 957,MRE 为 11.607 2%, D 为 0.855 8,V3R1W2 模拟效果最差,率定 R^2 为 0.585 4,MRE 为 13.936 9%, D 为 0.829 5;检验 R^2 为 0.509,MRE 为 14.992 1%, D 为 0.805 5。而由其他 3 种影响因子组成的组合模拟效果不稳定,其中 V2R1T2 模型模拟效果最好,率定 R^2 为 0.700 9,MRE 为 11.717 7%, D 为 0.859 6;检验 R^2 为 0.614 1,MRE 为 12.895 6%, D 为 0.829 9,V3R3T1 模拟效果最差,率定 R^2 为 0.183 9,MRE 为 26.451 8%, D 为 0.671 8;检验 R^2 为 0.137 8,MRE 为 26.703 5%, D 为 0.694 8。

在 4 个影响因子组合模拟效果对比时,4 因子组合是在 3 因子组合中包含土壤含水率的限制函数的组合中再加入气温,对比 3 因子组合的模拟效果,4 因子组合模拟效果反而变差。图 4 为不同季节饱和和水汽压差和气温的关系曲线。由图 4 可知,饱和和水汽压差与气温呈指数关系,VPD- T 关系的斜率随着气温的增加而增大,即气温越高,饱和和水汽压差对气温越敏感。从中推断出,在中午气温高时,气温的轻微增加会导致 VPD 对蒸腾耗水的强烈响应,从而导致气孔暂时关闭,以保存水分,而这种影响在气温较高的环境中更为明显。因此,与在模型中单独使用 VPD 的限制函数相比,在模型中同时使用 VPD 和 T 的限制函数可能会降低模拟效果。

2.3.2 限制函数的环境响应

J-S 模型中考虑单一影响因子的限制函数的响应曲线如图 5 所示,光合有效辐射、饱和水汽压差、气温的限制函数趋势基本一致,而土壤含水率的

限制函数对应的临界值不同,但均有超过临界值就保持不变为 1 mm/d 的特点,由图 5 可看出,土壤含水率的第 3 种限制函数曲线临界值最大,且最能反映蒸腾耗水量与土壤含水率之间的关系,故包含该限制函数的模型模拟效果优于包含其他两种限制函数的模型。

2.3.3 最优模型模拟效果

图 6 为基于贝叶斯估算方法的最优参数模型模拟结果与实测值对比,即 V1R2W3 模型的模拟值与实测值的对比。由图 6 得知,实测值点均落在模拟值折线附近,表示模型模拟效果较好。率定部分和检验部分数据实测值和模拟值总体趋势一致,但率定部分实测值与模拟值更为接近。从图 6 可以看出,实测点大致落在 95% 不确定性区间内,但仍有少部分数据在不确定性区间外,表明模拟效果有改进空间,率定部分不确定性区间平均宽度为 0.53,检验部分为 0.54,率定部分不确定性区间更窄。

V1R2W3 模型和 V1R2W3T2 模型蒸腾量模拟值与实测值相关关系如图 7 所示,两个模型实测值和模拟值整体较好地沿 1:1 线分布,但也有些离散点,以 V1R2W3 模型为例,模型率定部分 ($T_e = 0.71T_m + 0.62$, $R^2 = 0.76$, $D = 0.88$, MRE 为 10.57%) 模拟效果较检验部分数据 ($T_e = 0.66T_m + 0.77$, $R^2 = 0.69$, $D = 0.86$, MRE 为 11.61%) 模拟效果更好。V1R2W3 模型和 V1R2W3T2 模型相比较,前者模拟效果更好,率定部分与检验部分拟合直线与 1:1 线距离更近,而且率定部分前者较后者 R^2 高 0.01,MRE 低 0.06 个百分点,检验部分 R^2 高 0.02,MRE 低 0.21 个百分点,表示再加上气温的限制函数之后,模型模拟效果降低,说明气温在 J-S 模型中影响不显著。

图 8a 为误差(实测值与模拟值的差值)与实测蒸腾量之间的相关关系,图 8b 为全生育期误差频率直方图。由图 8 可以看出,误差频率分布大致呈正态分布,模型在高蒸腾时有低估,在低蒸腾时有高估,表明模型模拟效果还有一定的改进空间。

表 2 基于贝叶斯分析的蒸腾模型对比结果

Tab.2 Comparison of various transpiration models based on Bayesian analysis

JS 模型	率定			检验		
	MRE/%	R^2	D	MRE/%	R^2	D
W1	39.635 4	0.260 7	0.554 5	42.315 2	0.240 7	0.537 4
W2	29.053 1	0.372 0	0.607 0	30.970 5	0.309 6	0.589 4
W3	33.688 7	0.306 0	0.577 2	34.609 9	0.281 3	0.566 2
V1	25.972 8	0.111 8	0.650 4	26.315 0	0.108 1	0.637 7
V2	43.001 1	0.132 4	0.523 3	45.901 9	0.129 4	0.512 9
V3	23.713 8	0.090 3	0.680 1	24.378 8	0.085 2	0.669 0
R1	24.859 2	0.034 7	0.704 9	25.021 8	0.017 5	0.707 9
R2	24.553 4	0.036 4	0.710 7	24.713 1	0.018 5	0.712 9
R3	27.625 4	0.025 1	0.663 8	27.454 7	0.012 4	0.674 8
T1	29.918 4	0.000 4	0.627 9	31.318 3	0.000 3	0.619 0
T2	33.657 3	0.000 9	0.604 2	34.047 0	0.003 7	0.603 6
W1 + LAI	27.465 4	0.536 6	0.664 5	29.205 1	0.498 2	0.648 5
W2 + LAI	28.683 8	0.524 9	0.617 1	29.723 2	0.449 6	0.606 7
W3 + LAI	24.295 3	0.536 6	0.665 0	24.722 2	0.492 2	0.654 8
V1 + LAI	22.540 1	0.326 1	0.696 4	23.006 7	0.298 9	0.686 4
V2 + LAI	27.807 5	0.515 3	0.647 2	29.810 6	0.467 0	0.631 3
V3 + LAI	21.193 5	0.315 1	0.711 7	21.763 5	0.282 4	0.702 1
R1 + LAI	21.606 6	0.311 3	0.742 7	21.146 6	0.284 3	0.758 7
R2 + LAI	21.359 2	0.328 2	0.747 8	20.904 9	0.300 1	0.763 1
R3 + LAI	24.854 9	0.214 5	0.694 1	24.206 3	0.194 1	0.718 7
T1 + LAI	26.860 2	0.112 7	0.682 0	27.605 5	0.084 9	0.678 9
T2 + LAI	25.924 4	0.140 1	0.681 4	25.888 2	0.151 1	0.685 6
V1R1W1 + LAI	14.845 0	0.649 2	0.809 1	17.159 2	0.601 1	0.776 3
V2R3W1 + LAI	13.693 3	0.615 5	0.831 4	14.483 2	0.579 3	0.813 1
V3R2W1 + LAI	12.708 7	0.676 1	0.852 7	13.674 6	0.594 3	0.826 9
V1R3W2 + LAI	14.318 4	0.591 4	0.817 8	15.330 5	0.534 1	0.798 7
V2R2W2 + LAI	13.988 7	0.588 9	0.827 4	14.836 5	0.512 7	0.803 4
V3R1W2 + LAI	13.936 9	0.585 4	0.829 5	14.992 1	0.509 0	0.805 5
V1R2W3 + LAI	10.574 7	0.761 5	0.881 5	11.607 2	0.695 7	0.855 8
V2R2W3 + LAI	27.192 1	0.703 9	0.672 5	25.621 9	0.665 1	0.693 5
V2R3W3 + LAI	11.263 6	0.740 7	0.868 4	26.766 4	0.676 6	0.681 3
V2R1W3 + LAI	10.931 2	0.746 8	0.875 7	12.075 9	0.674 0	0.849 7
V3R3W3 + LAI	11.256 4	0.742 6	0.871 5	12.480 7	0.690 3	0.850 1
V1R1T1 + LAI	12.745 5	0.635 1	0.832 4	14.427 8	0.558 2	0.803 9
V1R2T2 + LAI	11.699 3	0.698 0	0.858 6	12.996 6	0.603 7	0.828 8
V1R3T2 + LAI	11.388 8	0.697 4	0.855 7	13.108 9	0.610 2	0.824 2
V2R1T2 + LAI	11.717 7	0.700 9	0.859 6	12.895 6	0.614 1	0.829 9
V2R2T1 + LAI	25.908 9	0.312 2	0.678 4	26.035 4	0.240 1	0.686 9
V2R3T2 + LAI	12.816 0	0.645 6	0.841 8	13.765 8	0.602 2	0.821 2
V3R1T2 + LAI	11.870 6	0.695 5	0.857 9	13.158 6	0.601 7	0.828 6
V3R2T2 + LAI	11.915 3	0.695 0	0.858 0	13.203 7	0.600 7	0.828 5
V3R3T1 + LAI	26.451 8	0.183 9	0.671 8	26.703 5	0.137 8	0.694 8
V1R1W1T1 + LAI	16.443 9	0.487 3	0.767 2	17.645 9	0.405 1	0.740 9
V2R3W1T2 + LAI	12.810 9	0.646 1	0.841 7	13.799 8	0.602 4	0.820 8
V3R2W1T2 + LAI	11.922 7	0.695 1	0.857 6	13.205 4	0.600 8	0.828 4
V1R3W2T2 + LAI	15.675 8	0.466 3	0.773 9	17.453 6	0.401 5	0.747 0
V2R2W2T1 + LAI	19.058 8	0.432 7	0.715 9	20.560 2	0.361 6	0.684 6
V3R1W2T2 + LAI	13.352 4	0.598 6	0.830 7	14.891 7	0.508 5	0.803 3
V1R2W3T2 + LAI	10.622 6	0.747 0	0.876 6	11.822 0	0.674 5	0.849 3
V1R2W3T1 + LAI	18.920 0	0.468 0	0.725 0	19.247 5	0.424 4	0.706 7
V2R1W3T2 + LAI	10.773 1	0.737 2	0.872 3	12.135 5	0.652 8	0.842 9
V2R2W3T2 + LAI	10.834 0	0.735 0	0.871 6	12.180 5	0.649 3	0.842 1
V2R3W3T2 + LAI	10.976 0	0.737 0	0.865 8	12.612 8	0.680 2	0.842 7
V3R3W3T1 + LAI	18.364 6	0.446 8	0.775 0	19.714 8	0.362 6	0.761 5

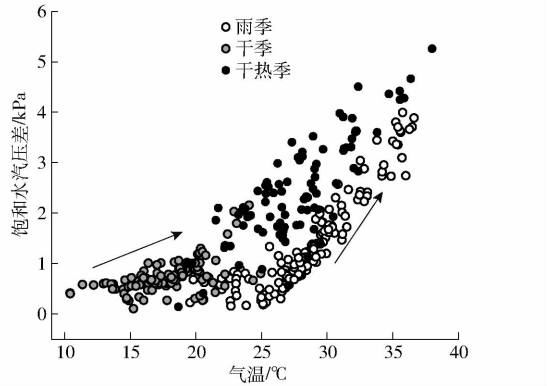


图4 不同季节饱和水汽压差和气温的关系曲线

Fig.4 Saturated water vapor with respect to temperature in different seasons

3 讨论

3.1 气象因子交互作用对蒸腾耗水模拟的影响

在WANG等^[31]的研究中,饱和水汽压差与温度呈指数关系,即温度越高,饱和水汽压差对温度越敏感,在中午气温高时,温度的轻微增加会导致对蒸腾耗水的强烈响应,从而导致气孔暂时关闭,以保存水分,而这种影响在温度较高的环境中更为明显。故在本研究中,如图4所示,VPD与*T*呈指数关系,为验证此结论,在考虑其他3因子的模型基础上,分别计算了考虑温度的模型与不考虑温度的模型模拟效果,对比得出不考虑温度的模型模拟效果较好。

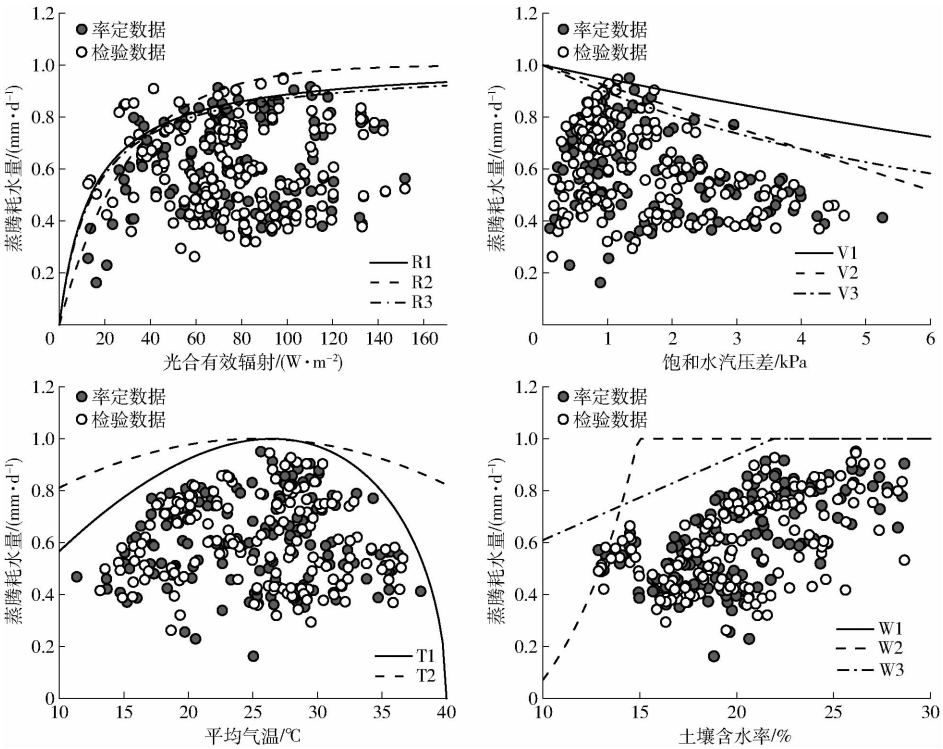


图5 J-S模型中考虑单一影响因子的限制函数响应曲线

Fig.5 Response curves of limit function with a single impact factor considered in J-S model

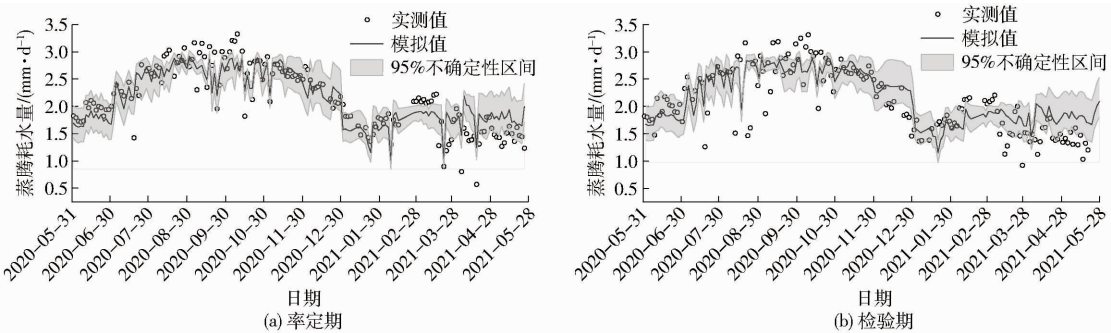


图6 基于贝叶斯估算方法的最优参数率定期与检验期模型模拟结果及相应的95%不确定性区间与实测值对比

Fig.6 Simulation results of optimal parameter rate and test period and corresponding 95% uncertainty interval compared with measured value based on Bayesian estimation method

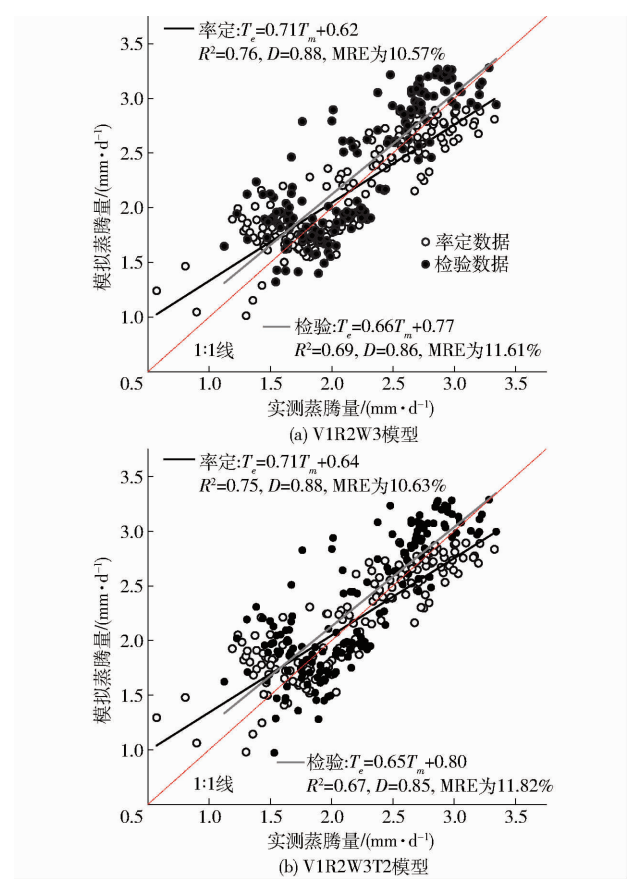


图 7 V1R2W3 模型和 V1R2W3T2 模型蒸腾量模拟值与实测值相关关系

Fig. 7 Correlation between simulated and measured transpiration values for V1R2W3 model and V1R2W3T2 model

因此,与在模型中单独使用 VPD 的限制函数相比,在模型中同时使用 VPD 和 T 的限制函数可能会降低模拟效果。这些结果都说明环境因子对蒸腾耗水的影响并非独立的,而是存在不同程度的交互影响效应。这种效应在蒸腾模拟过程中应得到充分重视。

3.2 模拟误差分析及改进建议

在本研究中,参数最优估计下的模型即 V1R2W3 模型模拟效果较好 ($R^2 = 0.76$, $D = 0.88$, MRE 为 10.57%),但仍有一些离散点,表明 J-S 模型仍有改进空间。

植物的蒸腾作用受到土壤-植被-大气界面的环境和生物物理过程的影响,且与气象因子密切相关^[32-36]。ZHENG 等^[14]认为 J-S 模型在大降雨事件期间和之后表现不佳,在大降雨事件中,模型没有捕捉到观测到的日蒸腾耗水量的大幅增加,可能是由于该模型中较低的 VPD 对日蒸腾耗水量模拟值有负面影响。本研究中,存在一些误差较大的数据(图 7),可能是由于当天降雨量较高、日照时数较短,导致饱和水汽压差较低,所以也可推测强降雨之后的低 VPD 是 J-S 模型不能得到较好模拟效果的

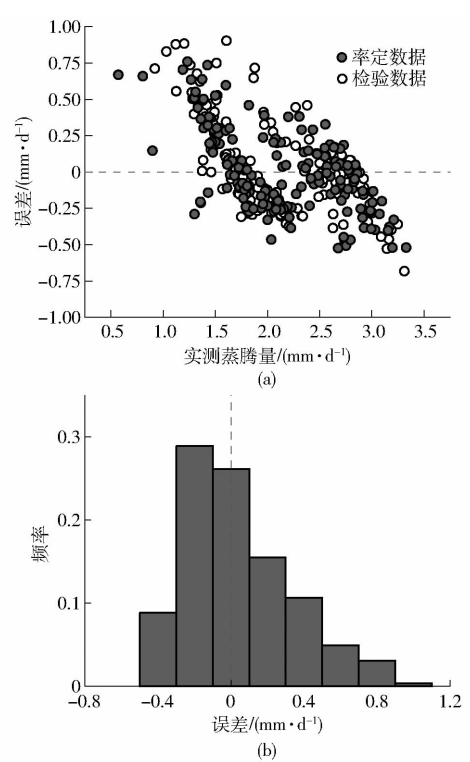


图 8 V1R2W3 模型误差与实测蒸腾量相关关系及全生育期误差频率

Fig. 8 Correlation between error of V1R2W3 model and measured transpiration water consumption, frequency histogram of error throughout entire growth period

重要原因。

由图 8b 可知,本研究中误差频率分布大致呈正态分布,模型在高蒸腾时有低估,在低蒸腾时有高估,所以模型效果仍需继续改进,故应对 J-S 模型进行进一步改进以提高模型模拟效果:①在 J-S 模型中考虑其他影响因子,如叶水势^[37]、叶片温度^[38]、外界 CO_2 浓度^[39]等。②添加重要的植物的生理过程比如植物内部组织储水等的表达^[40],能详实地表现植物冠层、气孔等特点^[41],并与光合作用等其他重要生理活动结合探索植物蒸腾过程中的气孔调节^[42]。③充分探索研究区干热多重环境胁迫条件下,影响因子对蒸腾耗水的耦合作用机制,量化交互效应,以提高基于影响因子相互独立假设影响下的 J-S 模型模拟效果。但考虑更多的过程可能会增加模型模拟的数据获取及计算难度,并增大不确定性。所以后续应综合考虑模型复杂程度、模拟精度、数据获取难度以及不确定性等,探究适宜的模型结构。

4 结论

(1)每个环境影响因子有多种常用限制函数表达式,在 J-S 模型中考虑不同环境因子及其限制函数表达式,组成不同结构的蒸腾耗水模型后

模拟效果存在差异,即其平均相对误差、决定系数、威尔莫特一致性指数和不确定性区间平均宽度均有所不同。

(2)在 J-S 蒸腾模型率定和检验中,考虑的影响因子越多,模型的模拟效果不一定越好,模拟效果与采用的影响因子重要程度及影响因子限制函

数形式、模型整体结构和参数数量等皆有关。

(3)贝叶斯参数估计方法通过高频次抽样和迭代显著缩小了参数先验范围,获取的模型参数后验分布基本实现 J-S 模型对于热河谷区橙子林蒸腾耗水的可靠模拟,但模型模拟效果依然存在很大的改善空间,需进一步提高模拟效果。

参 考 文 献

[1] GRANIER A, BIRON P, LEMOINE D. Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2000, 100(4): 291-308.

[2] WHITLEY R, MEDLYN B, ZEPPEL M, et al. Comparing the Penman-Monteith equation and a modified Jarvis-Stewart model with an artificial neural network to estimate stand-scale transpiration and canopy conductance[J]. Journal of Hydrology, 2009, 373(1): 256-266.

[3] PENMAN H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1948, 193(1032): 120-145.

[4] PENMAN H L. Evaporation: an introductory survey[J]. Netherlands Journal of Agricultural Science, 1956, 4(1): 9-29.

[5] MONTEITH J I L. Evaporation and environment[J]. Symposia of the Society for Experimental Biology, 1965, 19: 205-234.

[6] 韩磊,何俊,齐拓野,等. 宁夏河东沙区侧柏冠层气孔导度对环境因子的响应及其模拟[J]. 生态学杂志, 2018, 37(9): 2862-2868.

HAN Lei, HE Jun, QI Tuoye, et al. Response and modeling of canopy stomatal conductance of *Platycladus orientalis* to environmental factors in Hedong sandy land, Ningxia[J]. Journal of Ecology, 2018, 37(9): 2862-2868. (in Chinese)

[7] LI W, SI J, YU T, et al. Response of *Populus euphratica* Oliv. sap flow to environmental variables for a desert riparian forest in the Heihe River Basin, Northwest China[J]. Journal of Arid Land, 2016, 8(4): 591-603.

[8] XU S, YU Z, JI X, et al. Comparing three models to estimate transpiration of desert shrubs[J]. Journal of Hydrology, 2017, 550(7): 603-615.

[9] GUYOT A, FAN J, OESTERGAARD K T, et al. Soil-water content characterisation in a modified Jarvis-Stewart model: a case study of a conifer forest on a shallow unconfined aquifer[J]. Journal of Hydrology, 2017, 544(1): 242-253.

[10] SAMANTA S, CLAYTON M K, MACKAY D S, et al. Quantitative comparison of canopy conductance models using a Bayesian approach[J]. Water Resources Research, 2008, 44(9): 3-5.

[11] ZHU G, SU Y, LI X, et al. Estimating actual evapotranspiration from an alpine grassland on Qinghai-Tibetan plateau using a two-source model and parameter uncertainty analysis by Bayesian approach[J]. Journal of Hydrology, 2013, 476(1): 42-51.

[12] 王秀珍,胡保文,谢新乔,等. 新平县烤烟种植气候适宜性评价[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(3): 225-227.

WANG Xiuzhen, HU Baowen, XIE Xinqiao et al. Climate suitability evaluation of flue-cured tobacco planting in Xinping County[J]. Anhui Agricultural Science, 2021, 49(3): 225-227. (in Chinese)

[13] GRANIER A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J]. Tree Physiology, 1988, 3(4): 309-320.

[14] ZHENG J, FAN J, ZHANG F, et al. Estimation of rainfed maize transpiration under various mulching methods using modified Jarvis-Stewart model and hybrid support vector machine model with whale optimization algorithm[J]. Agricultural Water Management, 2021, 249: 106799.

[15] LI S, KANG S, ZHANG L, et al. Quantifying the combined effects of climatic, crop and soil factors on surface resistance in a maize field[J]. Journal of Hydrology, 2013, 489: 124-134.

[16] ORTEGA-FARIAS S, POBLETE-ECHEVERRERA C, BRISSON N. Parameterization of a two-layer model for estimating vineyard evapotranspiration using meteorological measurements[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2010, 150(2): 276-286.

[17] POYATOS R, VILLAGARCA L, DOMINGO F, et al. Modelling evapotranspiration in a Scots pine stand under Mediterranean mountain climate using the GLUE methodology[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2007, 146(1-2): 13-28.

[18] DING R, KANG S, HAO X, et al. Modeling crop water use in an irrigated maize cropland using a biophysical process-based model[J]. Journal of Hydrology, 2015, 529(10): 276-286.

[19] KATO T, KIMURA R, KAMICHIKA M. Estimation of evapotranspiration, transpiration ratio and water-use efficiency from a sparse canopy using a compartment model[J]. Agricultural Water Management, 2004, 65(3): 173-191.

[20] HARRIS P P, HUNTINGFORD C, COX P M, et al. Effect of soil moisture on canopy conductance of Amazonian rainforest[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2004, 122(3-4): 215-227.

[21] ZHANG B, KANG S, LI F, et al. Comparison of three evapotranspiration models to Bowen ratio-energy balance method for a vineyard in an arid desert region of northwest China[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2008, 148(10): 1629-1640.

[22] WANG H, GUAN H, SIMMONS C T. Modeling the environmental controls on tree water use at different temporal scales[J].

- Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 225: 24–35.
- [23] VAN OIJEN M, ROUGIER J, SMITH R. Bayesian calibration of process-based forest models: bridging the gap between models and data[J]. *Tree Physiol*, 2005, 25(7): 915–927.
- [24] SVENSSON M, JANSSON P E, GUSTAFSSON D, et al. Bayesian calibration of a model describing carbon, water and heat fluxes for a Swedish boreal forest stand[J]. *Ecological Modelling*, 2008, 213(3–4): 331–344.
- [25] BAYES M, PRICE M. An essay towards solving a problem in the doctrine of chances[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series I*, 1763, 53: 370–418.
- [26] LUNN D J, THOMAS A, BEST N, et al. WinBUGS—a Bayesian modelling framework: concepts, structure, and extensibility [J]. *Statistics and Computing*, 2000, 10(4): 325.
- [27] KASS R E, CARLIN B P, NEAL G R M. Markov chain Monte Carlo in practice: a roundtable discussion[J]. *American Statistician*, 1998, 52(2): 93–100.
- [28] GELMAN A, RUBIN D B. Inference from iterative simulation using multiple sequences[J]. *Statistical Science*, 1992, 7(4): 457–472.
- [29] DE JAGER J M. Accuracy of vegetation evaporation ratio formulae for estimating final wheat yield[J]. *Water SA*, 1994(20): 307.
- [30] 董磊华,熊立华,万民. 基于贝叶斯模型加权平均方法的水文模型不确定性分析[J]. *水利学报*, 2011, 42(9): 1065–1074.
- DONG Leihua, XIONG Lihua, WAN Min. Uncertainty analysis of hydrological modeling using the Bayesian model averaging method[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(9): 1065–1074. (in Chinese)
- [31] WANG H, GUAN H, DENG Z, et al. Optimization of canopy conductance models from concurrent measurements of sap flow and stem water potential on Drooping Sheoak in South Australia[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(7): 6154–6167.
- [32] 杜斌,胡笑涛,王文娥,等. 交替沟灌玉米灌浆期茎流影响因子敏感性分析与模型适用性研究[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(2): 233–245.
- DU Bin, HU Xiaotao, WANG Wene, et al. Stem flow influencing factors sensitivity analysis and stem flow model applicability in filling stage of alternate furrow irrigated maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(2): 233–245. (in Chinese)
- [33] 王婷,刘春伟,张佩,等. 江苏地区不同参考作物蒸发蒸腾量估算模型[J]. *排灌机械工程学报*, 2023, 41(1): 70–79.
- WANG Ting, LIU Chunwei, ZHANG Pei, et al. Estimation model of evapotranspiration(ET₀) of different reference crops in Jiangsu area[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2023, 41(1): 70–79. (in Chinese)
- [34] 原桂霞,张涛,温江丽. 不同时间尺度下温室西瓜蒸腾与环境因子关系[J]. *排灌机械工程学报*, 2023, 41(10): 1051–1057.
- YUAN Guixia, ZHANG Tao, WEN Jiangli. Relationship between transpiration of greenhouse watermelon and environmental factors at different time scales[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2023, 41(10): 1051–1057. (in Chinese)
- [35] 张健利,王振华,刘茹华,等. 水肥互作对滴灌红枣耗水及产量的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2023, 41(6): 597–604.
- ZHANG Jianli, WANG Zhenhua, LIU Ruhua, et al. Effects of water and fertilizer interaction on water consumption and yield of jujube under drip irrigation[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2023, 41(6): 597–604. (in Chinese)
- [36] 唐志瀚,王猛猛,张鹏,等. 温室番茄循环曝气地下滴灌土壤水分动态及耗水特性[J]. *排灌机械工程学报*, 2022, 40(5): 504–510.
- TANG Zhihan, WANG Mengmeng, ZHANG Peng, et al. Soil moisture dynamics and water consumption characteristics of tomato under cyclic aeration subsurface drip irrigation in greenhouse[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2022, 40(5): 504–510. (in Chinese)
- [37] MEDLYN B E, DUURSMA R A, EAMUS D, et al. Reconciling the optimal and empirical approaches to modelling stomatal conductance[J]. *Glob. Change Biol.*, 2012, 17(6): 2134–2144.
- [38] LI X, YANG P, REN S, et al. An improved canopy transpiration model and parameter uncertainty analysis by Bayesian approach[J]. *Mathematical & Computer Modelling*, 2010, 51(11–12): 1368–1374.
- [39] SAMANTA S, MACKAY D S, CLAYTON M K, et al. Bayesian analysis for uncertainty estimation of a canopy transpiration model[J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(4): W4424.
- [40] INDIRA P, AMOS N, YONI G, et al. Simulating nectarine tree transpiration and dynamic water storage from responses of leaf conductance to light and sap flow to stem water potential and vapor pressure deficit[J]. *Tree Physiology*, 2015(4): 425–438.
- [41] MACKAY D S, EWERS B E, LORANTY M M, et al. Bayesian analysis of canopy transpiration models: a test of posterior parameter means against measurements[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 432(4): 75–83.
- [42] LIN Y S, MEDLYN B E, DUURSMA R A, et al. Optimal stomatal behaviour around the world[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(5): 459–464.