

基于 Bayesian 的 Penman - Monteith 模型简易大棚蒸散模拟

李 群¹ 汪 星² 汪有科^{1,3} 纳文娟² 唐 燕² 吴久江¹

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 宁夏大学农学院, 银川 752201;
3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为实现 Penman - Monteith (PM) 模型在简易大棚中的蒸散模拟, 对 PM 模型中 2 个关键参数空气动力学阻力 r_a 和冠层边界层阻力 r_c 组成的 6 种 PM 模型使用 Bayesian 方法进行模型的参数估计和不确定性分析, 使用平均相对误差 (MAE)、决定系数 (R^2) 和威尔莫特一致性指数 (D) 3 个模型精度指标对模型率定年 (2018 年) 和检验年 (2019 年) 进行模型精度量化评价。结果表明: Bayesian 参数估计方法使 PM 模型在简易大棚日尺度蒸散估算精度较高, 6 种 PM 模型中有 5 种在模型率定年和模型检验年同时满足 3 个精度指标。Bayesian 参数估计方法能有效减小简易大棚日尺度 PM 模型中部分参数的不确定性, 在模型 $r_{a2} - r_{c3}$ 中参数 a_2 的后验分布区间较先验分布区间在 4 个生育阶段分别缩小了 97.65%、92.38%、93.31% 和 98.24%, 在模型 $r_{a2} - r_{c2}$ 中参数 D_{50} 、 K_Q 、 Q_{50} 和 g_{max} 在膨果期后验分布区间较先验分布区间分别缩小了 96.44%、56.08%、97.78% 和 99.75%。筛选出 $r_{a2} - r_{c3}$ 和 $r_{a3} - r_{c3}$ 2 种适宜简易大棚日尺度蒸散模拟的 PM 模型, 其中最优模型为 $r_{a2} - r_{c3}$ 。研究可为提高简易大棚作物灌溉及水分利用效率提供理论依据。

关键词: 蒸散模拟; 简易大棚; Penman - Monteith 模型; Bayesian 方法

中图分类号: S668.4; S274

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2022)01-0311-10

OSID:



Evapotranspiration Simulation of Penman - Monteith Model in Basic Greenhouse Based on Bayesian Method

LI Qun¹ WANG Xing² WANG Youke^{1,3} NA Wenjuan² TANG Yan² WU Jiujiang¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 752201, China
3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Basic greenhouse is a kind of primary greenhouse without operation equipment. At present, more than 90% of greenhouse in China belongs to basic greenhouse. In order to solve the problem of evapotranspiration simulation in basic greenhouse, Penman - Monteith (PM) model, which is the most widely used mechanism model in greenhouse, was used to simulate the evapotranspiration in basic greenhouse. Bayesian method was used to estimate the parameters and analyze the uncertainty of six PM models composed of two key parameters r_a (aerodynamics resistance) and r_c (canopy resistance). Three precision indexes, namely mean relative error (MAE), determination coefficient (R^2) and Wilmot consistency index (D), were used to evaluate the model accuracy for the model calibration year (2018) and test year (2019). The results showed that the Bayesian parameter estimation method made the PM evapotranspiration model with high accuracy in the basic greenhouse day scale estimation, and five of the six PM models met the three accuracy indexes in the model calibration year and model test year. The Bayesian parameter estimation method can effectively reduce the uncertainty of some parameters in the basic greenhouse day scale PM model. In the model $r_{a2} - r_{c3}$, the posterior distribution interval of parameter a_2 was reduced by 97.65%, 92.38%, 93.31% and 98.24%, respectively in the four growth stages compared with the prior distribution interval. In the model $r_{a2} - r_{c2}$, the posterior distributions

收稿日期: 2020 - 12 - 15 修回日期: 2021 - 02 - 18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32060301) 和国家重点研发计划项目 (2017YFC0504402)

作者简介: 李群 (1990—), 男, 博士生, 主要从事农业水资源高效利用和农业物联网研究, E-mail: lq_@nwfu.edu.cn

通信作者: 汪有科 (1956—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业水资源高效利用和水土保持研究, E-mail: gjzwyk@vip.sina.com

interval of parameters D_{50} , K_Q , Q_{50} and $g_{\max}$ were reduced by 96.44%, 56.08%, 97.78% and 99.75%, respectively compared with the prior distribution interval. Two PM models suitable for daily scale evapotranspiration simulation of basic greenhouse were screened out: $r_{a2}-r_{c3}$ and $r_{a3}-r_{c3}$, the optimal model was $r_{a2}-r_{c3}$. The research result can provide theoretical basis for improving crop irrigation and water use efficiency in basic greenhouse.

Key words: evapotranspiration simulation; basic greenhouse; Penman – Monteith model; Bayesian method

0 引言

大量研究表明 Penman – Monteith (PM) 模型可以应用在温室环境蒸散估算^[1-2], 并且目前是温室蒸散模拟应用最广泛的机理模型^[3-4]。当前国内外学者对温室 PM 蒸散模拟的研究多以智能自控温室为载体, 简易大棚应用 PM 模型估算蒸散量少有报道。我国 90% 以上的温室属于简易大棚^[5-6], 如小跨度塑料大棚的蒸散模拟鲜有报道^[7-9]。由于温室环境与大田环境相比风速明显更低, PM 模型的关键参数空气动力学阻力 r_a 使用常用的 Perrier 公式往往会被过高估计, 进而导致 PM 模型的模拟效果较差^[10-13]。为解决这一问题, BOULARD 等^[14]提出一种基于温室外部环境估算温室蒸散的方法, 李军等^[7]在我国长江下游单栋塑料大棚中使用此方法模拟塑料大棚小白菜蒸散结果较好。但这种方法要求温室空气与室外环境耦合紧密, 即需长期保持温室自然通风, 不适合在我国北方地区冬季使用。陈新明等^[15]与王健等^[12]在日光温室环境中将风速取 0 并使用 THOM 等^[16]的公式计算 r_a , 这种方法有效解决了温室低风速条件下 r_a 被过高估计的问题, 但对于大棚有通风情况下的蒸散估算仍未涉及。孙怀卫等^[8]建立了华东地区塑料大棚内部风速与外部风速的线性关系, 并基于能量平衡和紊流扩散理论建立了韭菜蒸腾模型。这种方法较为繁琐, 需要使用计算流体动力学 (Computational fluid dynamics, CFD) 分析棚内气流场特征。此外, 上述研究使用的 PM 模型其约束函数形式均是唯一的, 这会导致模型模拟精度缺乏比较, 也没有考虑模型的不确定性。

PM 模型结构较为复杂, 子模型涉及的待率定参数较多, 模型的不确定性可能较强, 基于上述考虑选择使用 Bayesian 方法作为模型参数率定方法。Bayesian 方法将参数的概率分布、实测数据、参数波动范围和不确定性的相关假设相结合, 既考虑了模型参数、输入变量与输出结果的不确定性, 也考虑到了已知信息以及参数之间的互相影响^[17], 是一种适合高维模型参数率定的优秀方法^[18-19]。近 20 年来, Bayesian 方法在大田环境的蒸腾、蒸散模拟及模型不确定性分析中都得到了较好的应用^[18-21], 但在

温室蒸散模拟研究中很少使用 Bayesian 方法, 对温室蒸散模型不确定性的分析更是鲜有报道。

本研究在关中地区简易大棚中使用温室中应用最为广泛的 PM 蒸散机理模型, 进行简易大棚日尺度下章姬草莓蒸散模拟研究, 以期为简易大棚蒸散模拟提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于陕西省渭南市白水雷牙镇刘家卓村 (35°12'N, 109°36'E, 海拔 809 m), 年平均太阳总辐射 5 363.52 MJ/m², 年平均气温 11.4℃, 年平均降水量 577.8 mm。试验地 0~0.3 m 土层土壤质地均一, 土壤渗透性良好, 砂砾、粉粒和黏粒 3 种粒级质量分数分别为 70.1%、21.8%、8.1%, 属于沙质土。0~0.3 m 土层土壤容重为 1.39 g/cm³, 环刀法测得田间持水率为 35%, 计划湿润层深度取章姬草莓根系平均深度 0.3 m。定植时间为 2018 年 8 月 31 日傍晚, 定植期共 12 d。使用宽窄行起垄方式栽植, 9 垄, 下宽 0.45 m, 上宽 0.3 m, 垄高 0.35 m, 间距 0.25 m, 每垄 660 株, 栽植 2 行, 行距 0.3 m, 株距 0.2 m, 每公顷约栽 90 000 株。栽植时同一行植株的花序朝同一方向, 使草莓苗弓背朝花序预定生长方向, 苗心露出畦面, 根系平展埋入疏松土层。草莓苗栽植后及时灌溉定植水, 灌至 0.3 m 深度土层使土壤含水率达到田间持水率, 定植水每 2 d 灌溉一次, 持续 13 d。使用国产迷宫式滴灌带, 滴灌带内径 16 mm, 额定流量 2 L/h, 滴孔间距 200 mm, 湿润比取 0.35, 灌溉水利用效率取 0.9。使用黑色 PVE 地膜以保温保墒, 定植后全地膜覆盖栽培。

1.2 数据采集与处理

试验区简易大棚中央距离地面 1 m 处设有小型气象站 (RR-9100 型) 自动监测记录气象数据 (步长 1 h), 测量指标包括空气温度、空气相对湿度、风速、太阳辐射, 试验数据采集时间段为 2018 年 8 月 31 日至 2020 年 3 月 15 日, 包含章姬草莓两个完整生育阶段。

章姬草莓冠层高度和叶面积指数每 5 d 测量一次, 待测样本植株每次随机选取 50 株取平均值。测

量所选取植株所有有效长度和有效宽度,根据实测折算系数计算每株草莓的叶面积并取平均值,最后根据种植密度得到叶面积指数。实测蒸散量根据水量平衡原理,采用称量法测量草莓植株蒸散量。使用电子天平对桶栽草莓进行连续称量,试验桶内径 0.5 m,高 0.5 m,表面覆盖和棚内草莓相同的地膜。桶栽草莓共 6 桶,均匀分布在一个简易大棚中。实测蒸散量为 6 桶草莓蒸散量的平均值。

模型精度评价使用平均相对误差(MAE)、决定系数(R^2)和威尔莫特一致性指数(D),模型精度可靠的标准为 R^2 和 D 均大于 0.8 且 MAE 小于 20%。使用 Bayesian 方法估算 PM 模型中参数的后验分布,并分析参数的不确定性。

1.3 PM 模型

PM 模型是一种基于能量平衡原理的蒸散机理模型,是目前温室蒸散模拟应用最广泛的机理模型^[3-4],PM 模型一般形式为

$$\lambda_{ET} = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a C_p \frac{e_s - e_a}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \tag{1}$$

式中 λ_{ET} ——潜热通量, W/m^2
 Δ ——饱和水汽压-温度关系曲线在平均气温 T 处的切线斜率, kPa/K
 R_n ——净辐射通量, W/m^2
 G ——土壤热通量, W/m^2
 ρ_a ——空气密度,取 $1.29 \text{ kg}/\text{m}^3$
 C_p ——空气定压比热容,取 $1\,004 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
 e_s ——饱和水汽压, kPa
 e_a ——实际水汽压, kPa
 r_c ——冠层边界层阻力, s/m
 γ ——湿度计常数,取 $0.067 \text{ kPa}/\text{K}$
 r_a ——空气动力学阻力, s/m

其中, r_a 和 r_c 是两个关键参数。

1.3.1 空气动力学阻力模型

1.3.1.1 Perrier 公式法

r_a 模型包括 PERRIER^[22] 提出的 Perrier 公式,此公式已在通风条件较好的大田环境下得到普遍认可^[18,23]。多数研究认为该公式在温室低风速环境中并不适用^[10-13]。最终 Perrier 公式可以表达为仅与冠层高度 h_c 和参考高度处风速 u_z 相关,计算式为

$$r_{a1} = 6.25 \frac{\ln \frac{0.37h_c + 1.5}{0.13h_c} \ln \frac{0.37h_c + 1.5}{0.37h_c}}{u_z} \tag{2}$$

1.3.1.2 Thom 风速零值法

THOM 等^[16] 提出的 r_a 公式(Thom 公式)不会因

为风速趋近 0 而使得 r_a 被高估。JACKSON 等^[24] 认为此模型在低风速、高风速条件下均有良好的适用性。参考王健等^[12] 与陈新明等^[15,25] 的研究,直接将温室中风速取 0 得到 r_a 修正式 $r_{a2} = 4.72 \times \frac{\left(\ln \frac{z-d}{z_0}\right)^2}{1 + 0.54u_z}$, z 为参考高度(m), $z = h_c + 1.5$; z_0 为动量传输粗糙度长度(m), $z_0 = 0.13h_c$; d 为零平面位移(m), $d = 0.63h_c$ 。即

$$r_{a2} = 4.72 \left(\ln \frac{0.37h_c + 1.5}{0.13h_c} \right)^2 \tag{3}$$

1.3.1.3 热传输系数法

温室内水汽以涡流方式扩散, r_a 可以通过热传输系数计算^[26]。温室的对流类型可分为自由对流、强迫对流和混合对流,计算热传输系数 h_s 时先判定出对流类型,之后根据不同对流类型的公式计算对应的 h_s ^[27-28]。表 1 列出了热传输系数法中 3 种对流类型出现的比例,以及各类对流类型条件下与 h_s 相关的因子。由表 1 可知,温室通风时绝大部分时间温室内的对流都属于强迫对流,强迫对流条件下冠层高度风速 u 与 h_s 正相关,叶片特征长度 d_c 与 h_s 负相关;不通风时绝大部分时间属于混合对流,冠层温度与空气温度的差值 Δ_t 、 u 分别与 h_s 正相关。

表 1 3 种对流出现比例以及与 h_s 相关的因子

Tab.1 Proportion of three kinds of convection and h_s related factors

对流类型	出现比例/%	与 h_s 相关的因子	
		正相关	负相关
自由对流	3(不通风)	Δ_t	d_c
混合对流	97(不通风)	Δ_t 、 u	d_c
强迫对流	100(通风)	u	d_c

将 3 类对流条件下计算出的热传输系数 h_s 代入可计算得到 r_a ^[26],即

$$r_{a3} = \frac{\rho_a C_p}{2h_s LAI} \tag{4}$$

式中 LAI ——叶面积指数

1.3.2 冠层边界层阻力模型

1.3.2.1 基于叶片气孔阻力的冠层边界层阻力模型

BAILEY 等^[26] 通过分析叶片气孔阻力 r_s 与气象因子的响应,构建了基于有效叶面积指数 LAI_e 的冠层边界层阻力 r_c 模型,计算式为

$$r_{cl} = \frac{r_s}{LAI_e} \tag{5}$$

其中 $LAI_e = \frac{LAI}{0.3LAI + 1.2}$ (6)

r_s 是确定 r_c 的关键参数,由气象因子、水分条件

所决定^[29-30]。本研究简易大棚章姬草莓实施充分灌溉,对 r_s 与简易大棚内气象因子的相关关系分析结果显示,太阳辐射 R_s 为影响 r_s 的主要气象因子,这一结果与文献[31-32,10]对温室番茄和甜椒的研究结果相似。图1为最终通过非线性拟合得出的 R_s 与 r_s 的关系,其关系式为

$$r_s = 2\,918.65R_s^{-0.49} \tag{7}$$

综合式(5)~(7),最终构建出包含气象因子 R_s 和作物 LAI_c 的双因子 r_c 模型。

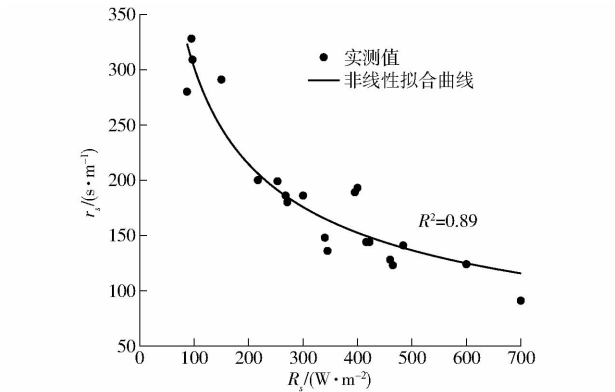


图1 简易大棚章姬草莓 r_s 与 R_s 的关系
Fig.1 Relationship between r_s and R_s of Akihime strawberry in basic greenhouse

1.3.2.2 基于冠层导度的冠层边界层阻力模型

冠层边界层阻力 r_c 是冠层导度 g_c 的倒数,通过构建气象因子、土壤含水率与冠层导度 g_c 的关系

$$g_c = \frac{g_{\max}}{K_q} \ln \left(\frac{Q_h + Q_{50}}{Q_h \exp(-K_q LAI) + Q_{50}} \frac{1}{1 + \frac{VPD}{D_{50}}} F_2 \right) \tag{8}$$

式中 $g_{\max}$ ——冠层顶部叶片最大气孔导度, m/s
 K_q ——短波辐射消光系数
 Q_h ——冠层顶部可见光通量密度, W/m^2
 Q_{50} ——冠层导度达到最大值一半时的可见光通量, W/m^2
 VPD ——空气饱和水汽压差, kPa
 D_{50} ——冠层导度达到最大值一半时的饱和水汽压差, kPa
 F_2 ——水分胁迫系数

求倒数后即可确立冠层边界层阻力 r_{c2} 模型^[19,33]。本研究中不存在水分胁迫,因此 F_2 取值恒为1。此模型共4个待定参数,分别为 $g_{\max}$ 、 K_q 、 Q_{50} 、 D_{50} 。

1.3.2.3 基于叶片气孔导度尺度提升的冠层边界层阻力模型

冠层边界层阻力 r_c 与冠层导度 g_c 是倒数关系,因此构建基于气孔导度 g_s 的 r_c 模型的一个基本思路是将 g_s 尺度转换到 g_c ,两种常见的 g_s 模型是Jarvis

模型^[34]和Ball模型^[35]。本研究参照张宝忠等^[36]的方法,基于 g_s 实测值建立 g_s 与气象因子(光合有效辐射 PAR 、 VPD 和空气温度 T_a ^[37-43])的Jarvis模型,再以光合有效辐射 PAR 为尺度转换因子,构建出基于气象因子 PAR 、 VPD 和 T_a 的冠层导度 g_c 模型。

g_c 模型可表示为 g_s 在叶面积指数上的积分,即

$$g_c = \int g_s(PAR_a)f_1(VPD)f_2(T_a) = \int_0^{LAI} f_1(VPD)f_2(T_a)g_s(\xi)d\xi \tag{9}$$

通过 PAR_a 作为尺度转换因子得到 g_c 模型为

$$g_c = \frac{1}{K} \frac{1}{1 + a_2 VPD} - a_3(a_4 - T)^2 \ln \left(\frac{KPAR_h + a_1}{KPAR_h \exp(-K LAI) + a_1} \right) \tag{10}$$

式中 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 ——待率定经验参数
 PAR_a ——叶片截获的光合有效辐射, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
 ξ ——冠层某一高度到冠层顶部的叶面积指数
 K ——消光系数
 PAR_h ——冠层顶部高度的光合有效辐射, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

最后求倒即可得到 r_{c3} 模型,此模型共5个待定参数,分别为 K 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 。

1.3.3 PM模型汇总

将上述PM模型中2个关键参数 r_a 和 r_c 的模型两两组合,共得到9种模型(表2)。其中涉及 r_{c2} 和 r_{c3} 的6种模型(*标记)使用Bayesian方法进行参数估计。

表2 PM模型汇总
Tab.2 Penman-Monteith models summary

模型	Perrier	Thom	热传输
	公式法 (r_{a1})	风速0值法 (r_{a2})	系数法 (r_{a3})
基于 r_s 的 r_c 模型(r_{c1})	$r_{a1} - r_{c1}$	$r_{a2} - r_{c1}$	$r_{a3} - r_{c1}$
基于 g_c 的 r_c 模型(r_{c2})	$r_{a1} - r_{c2}^*$	$r_{a2} - r_{c2}^*$	$r_{a3} - r_{c2}^*$
基于 g_s 尺度提升的 r_c 模型(r_{c3})	$r_{a1} - r_{c3}^*$	$r_{a2} - r_{c3}^*$	$r_{a3} - r_{c3}^*$

1.4 Bayesian参数估计方法

PM模型结构较为复杂,子模型 r_{c2} 和 r_{c3} 涉及的待率定参数较多(分别为4个和5个),模型的不确定性较强,基于上述考虑选择使用Bayesian方法作为模型参数率定方法。

子模型 r_{c2} 中的参数 $g_{\max}$ 、 K_q 、 Q_{50} 、 D_{50} 和子模型 r_{c3} 中的参数 K 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 作为参数向量 β 的组成部分,先验信息见表3。

表 3 PM 模型参数先验分布

Tab.3 Prior distribution of parameters in Penman – Monteith models

参数	先验分布		文献 序号
	下限	上限	
K	0	1	[19]
a_1	0	50	[21]
a_2	0	50	[21]
a_3	0	0.001	[42]
a_4	0	50	[42]
$g_{\max}/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	0	50	[44]
K_Q	0	1	[45]
$Q_{50}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	10	50	[46]
D_{50}/kPa	0.5	3	[46]

假设模型模拟值 S 与实测值 O 之间的差异即模型误差独立且服从方差 σ^2 为未知常数的正态分布,模型误差均值为 $0^{[47-48]}$,则包含 n 个观测值的实测数列似然函数为^[19]

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

(11)

式中 O_i ——第 i 个蒸散实测值
 $\boldsymbol{x}_i$ ——模型输入向量
 $S(\boldsymbol{x}_i,\boldsymbol{\beta})$ ——参数向量 $\boldsymbol{\beta}$ 下模型输出值
 σ ——模型误差的标准差

后验分布抽样使用基于 Gibbs 抽样的马尔科夫-蒙特卡罗 (MCMC) 方法,使用 WinBUGS 软件实现,运行 3 条平行 MCMC 链,迭代次数 30 万次并酌情增加。

2 结果与讨论

2.1 简易大棚日尺度空气动力学阻力 r_a 模型筛选

由表 4 可知, r_a 模型中 r_{a1} 表现最差, r_{a2} 与 r_{a3} 表现相当;分析 $r_{a1}-r_{c1}$ 、 $r_{a2}-r_{c3}$ 、 $r_{a3}-r_{c3}$, 可得出相同的结论。 r_{a1} 表现差的原因是 r_{a1} 模型中风速在分母,温室环境中日均风速较低,因此会高估 r_a 从而影响最终模型的估计效果,因此温室使用 r_{a1} 结果较好的报道很少^[49],一些研究甚至建议不在温室中使用这种方法^[10-13]。但本研究中 $r_{a1}-r_{c3}$ 模型完全符合 3 个精度指标, $r_{a1}-r_{c2}$ 模型仅率定年 D 指标稍微超出要求。因此,简易大棚日尺度条件下虽然 r_{a1} 较 r_{a2} 和 r_{a3} 表现差,但并非不可用,这一结论有别于现有温室环境的报道。 Perrier 公式法能在研究区使用的原因是棚栽草莓通风时间较长,另外简易大棚的密闭性较高端温室差,存在漏风情况,这些原因导致研究区简易大棚内部日均风速较一般温室高,进而使 Perrier 公式计算结果不会被过高估计。本研究统计

的棚内平均风速为 0.36 m/s (2018 率定年与 2019 检验年 2 年平均值),接近已有文献中日光温室风速日均值上限 (0 ~ 0.36 m/s)^[50],使用 Perrier 方法计算出的 r_{a1} 为 253.41,与已有的 r_a 报道差别不大^[29]。但由于 r_{a1} 模型与 r_{a2} 模型的复杂程度相当且远小于 r_{a3} , r_{a2} 模型与 r_{a3} 模型精度相当,因此从模型精度与复杂程度两个角度考虑,研究区简易大棚日尺度条件下推荐使用 r_{a2} 模型。

表 4 PM 模型蒸散模拟精度评价

Tab.4 Accuracy evaluation of evapotranspiration simulation in Penman – Monteith models

模型结构	年份	MAE/%	D	R^2
$r_{a1}-r_{c1}$	2018	21.190 96 *	0.725 456 *	0.71 *
	2019	24.678 41 *	0.686 715 *	0.65 *
$r_{a1}-r_{c2}$	2018	12.310 08	0.725 456 *	0.88
	2019	12.395 92	0.867 239	0.85
$r_{a1}-r_{c3}$	2018	11.978 25	0.881 694	0.86
	2019	11.518 88	0.879 748	0.82
$r_{a2}-r_{c1}$	2018	14.603 00	0.847 009	0.65 *
	2019	16.175 38	0.826 804	0.85
$r_{a2}-r_{c2}$	2018	11.834 84	0.881 790	0.88
	2019	12.055 81	0.864 853	0.83
$r_{a2}-r_{c3}$	2018	10.730 91	0.897 420	0.87
	2019	11.075 45	0.886 367	0.85
$r_{a3}-r_{c1}$	2018	21.109 03 *	0.786 248 *	0.87
	2019	16.787 05	0.801 141	0.75 *
$r_{a3}-r_{c2}$	2018	11.924 61	0.879 540	0.87
	2019	12.465 51	0.866 748	0.82
$r_{a3}-r_{c3}$	2018	10.541 68	0.897 146	0.88
	2019	11.273 74	0.880 280	0.83

注: * 表示不满足精度要求。

2.2 简易大棚日尺度冠层边界层阻力 r_c 模型筛选

简易大棚日尺度蒸散量模拟值与实测值相关关系如图 2 所示,可直观看除 $r_{a1}-r_{c1}$ 和 $r_{a2}-r_{c1}$ 拟合效果较差以外,其余各 PM 蒸散模型的日蒸散量模拟值与实测值能较好地沿 1:1 直线分布。 $r_{a3}-r_{c1}$ 虽然能较好沿直线 1:1 分布,但散点明显更分散,决定系数 R^2 也较低 (0.75)。分析 PM 蒸散模型精度评价 (表 4),发现包含 r_{c1} 子模型的 PM 蒸散模型表现最差。可能的原因是 r_{c1} 子模型考虑的作物-环境因子不全面,即模型缺少关键的作物-环境因子,进而导致一些关键的生理-物理过程被忽略,最终影响模型精度。 r_{c1} 涉及的因子仅有太阳有效辐射和叶面积指数, r_{c2} 较 r_{c1} 增加了描述冠层结构的参数项并增加了棚内水汽压亏缺这一环境因子, r_{c3} 较 r_{c1} 增加了温度、饱和水汽压亏缺等环境因子。 r_{c1} 较 r_{c2} 、 r_{c3} 缺少的这些因子都被证明是估算冠层导度的关键因子^[51]。

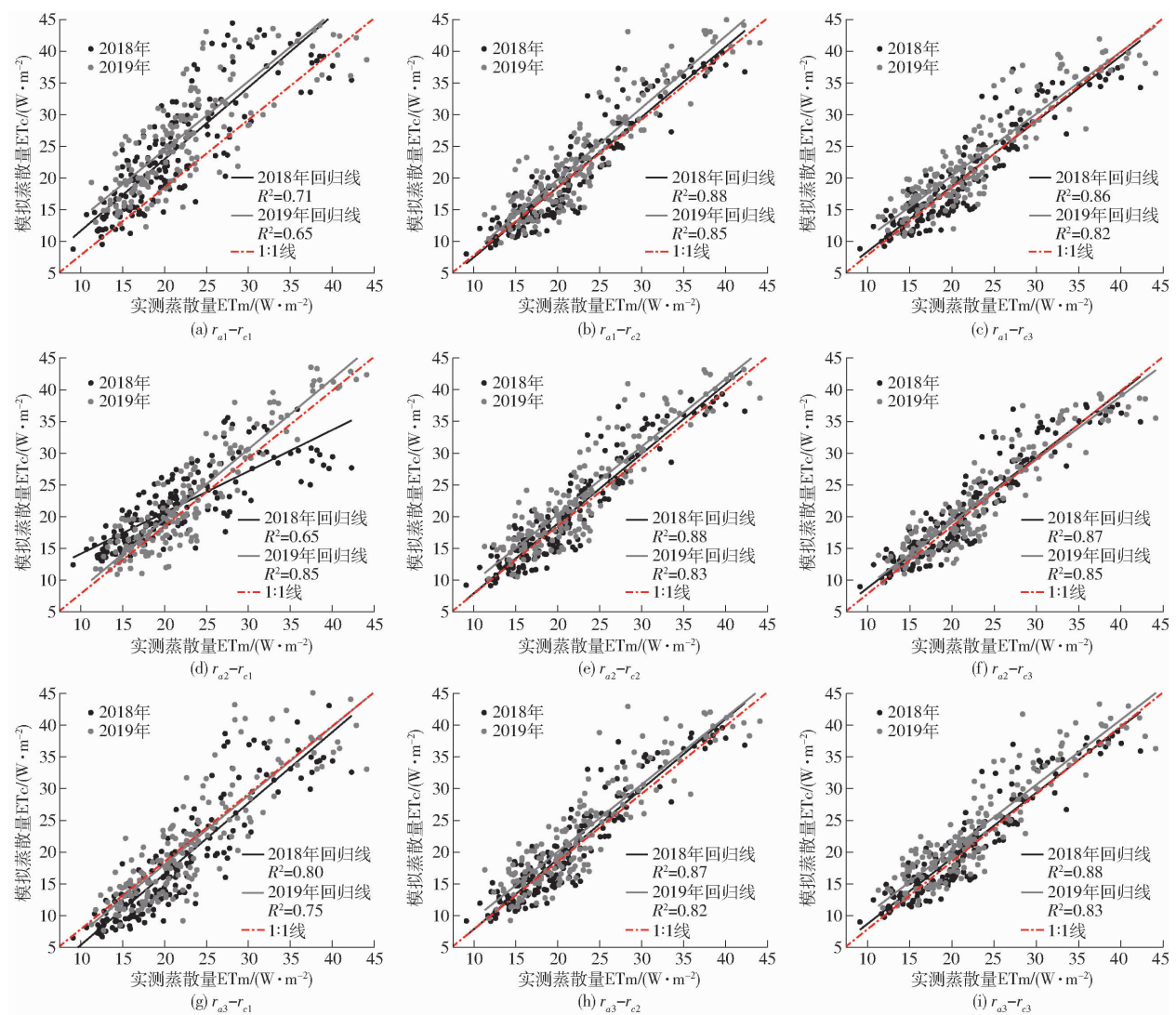


图2 简易大棚日尺度蒸散量模拟值与实测值相关关系

Fig.2 Correlations between simulated values of daily evapotranspiration and measured values in basic greenhouse

分析表4中 r_c 子模型 r_{c2} 和 r_{c3} ,发现 r_{c3} 较 r_{c2} 性能更好($r_{a2}-r_{c3}$ 优于 $r_{a2}-r_{c2}$, $r_{a3}-r_{c3}$ 优于 $r_{a3}-r_{c2}$)。对比 r_{c3} 与 r_{c2} 两个子模型,发现 r_{c3} 较 r_{c2} 多考虑了 T_a 这一环境因子,但子模型 r_{c3} 优于 r_{c2} 的原因并不一定是因为Javrris模型中 r_{c3} 多考虑了 T_a 因子。CHEN等^[52]通过对包含不同数量关键环境因子(1~4个)、不同约束函数形式共计191个Javrris模型进行了蒸腾模拟研究,发现Javrris模型中嵌套增加关键环境因子并不总是能提高模型性能,模型性能还取决于Javrris模型的约束函数形式。因此, r_{c3} 精度更高的一个可能原因是本文在组建Javrris模型时所选择的关键环境因子以及其约束函数形式综合起来更加适合研究区简易大棚的环境。此外, r_{c3} 子模型较 r_{c2} 子模型包含有更多的待率定经验参数,与之对应的是包含有更多的先验分布信息,这意味着Bayesian分析方法在参数率定的过程中可以利用更多的先验分布信息,这对减小模型不确定性、提高模型性能具有积极意义。因此, r_{c3} 精度更高的另一个可能原因

是Bayesian参数率定过程中先验信息更加充分。

r_{c3} 子模型中以光合有效辐射 PAR_a 为尺度转换因子,以光合有效辐射 PAR_a 和饱和水汽压差 VPD 构建的冠层导度估算模型被证明能较好地实现叶片气孔导度向冠层导度的尺度转化提升^[38],但此模型中包含有难以测量的因子——消光系数 K , K 在测量过程中容易产生测量误差,误差累积到达一定数量必然会影响模型精度。因此,当模型中包含难以实测的因子时,在先验信息充分的条件下建议尝试将此因子当作未知参数,结合Bayesian方法计算出这些难以实测因子的估计值。

2.3 简易大棚日尺度不同生育阶段的参数不确定性分析

同时满足3个精度指标的PM模型共有5个($r_{a1}-r_{c3}$ 、 $r_{a2}-r_{c2}$ 、 $r_{a2}-r_{c3}$ 、 $r_{a3}-r_{c2}$ 和 $r_{a3}-r_{c3}$),图3所示5个模型中涉及的大部分参数的95%置信度后验分布区间在不同生育阶段与先验分布区间相比明显缩小,这说明Bayesian方法在参数率定过程中减小了

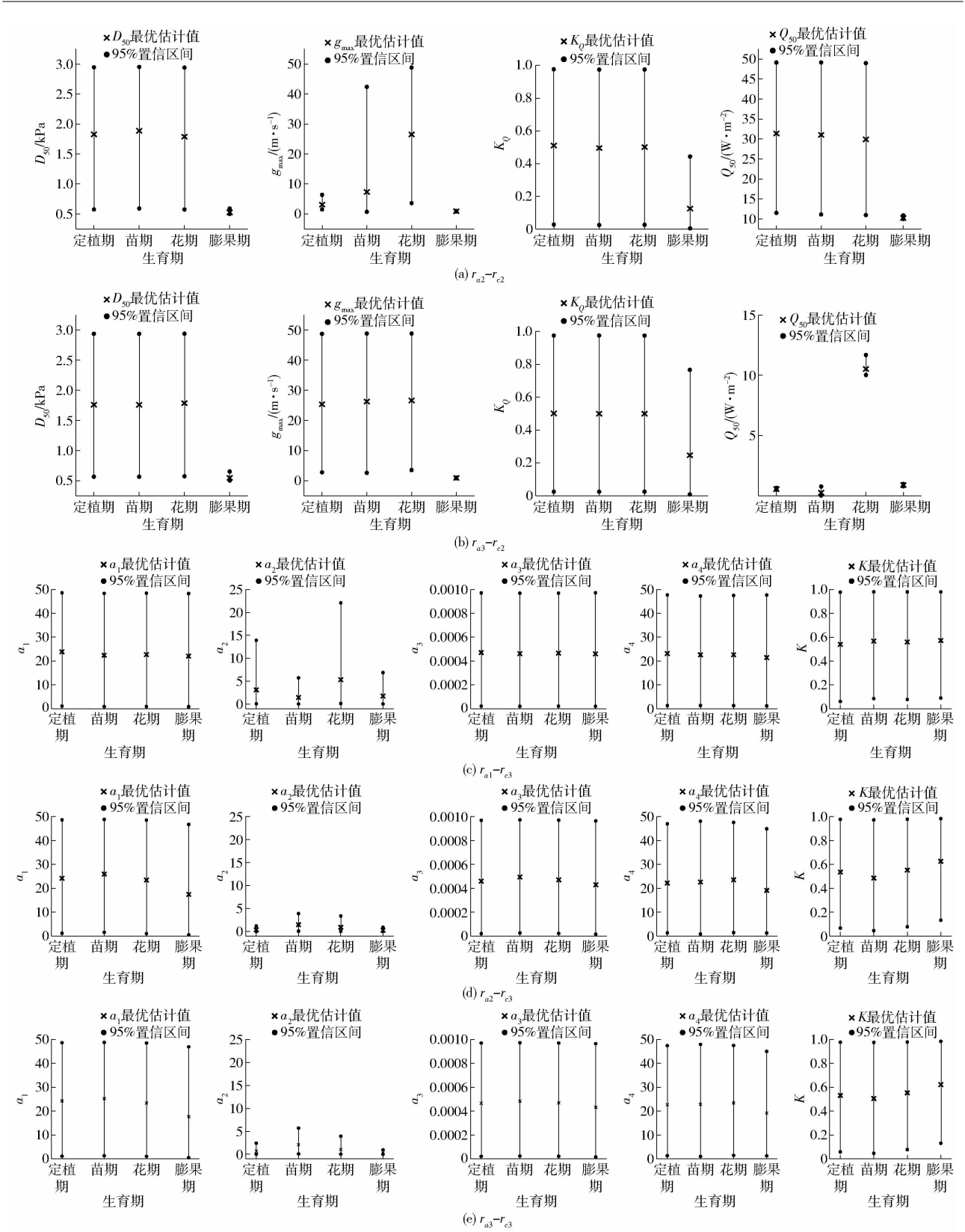


图 3 2018 年 PM 蒸散模型日尺度不同生育阶段参数最优估计值和 95% 置信区间

Fig. 3 Optimal estimation and 95% confidence interval of parameters in different growth stages of PM models in 2018

模型参数的不确定性,参数率定效果较好。某些参数仅在特定的生育阶段率定效果较好,在膨果期中参数 D_{50} 、 K_Q 、 Q_{50} 和 g_{max} 率定效果均较好。在模型 $r_{a2}-r_{c2}$ 和 $r_{a3}-r_{c2}$ 中,参数 D_{50} 的后验分布区间较先验分布区间分别缩小了 96.44% 和 93.98%,参数 K_Q

的后验分布区间较先验分布区间分别缩小了 56.08% 和 24.15%,参数 Q_{50} 的后验分布区间较先验分布区间分别缩小了 97.78% 和 99.50%,参数 g_{max} 的后验分布区间较先验分布区间分别缩小了 99.75% 和 99.68%。仅特定生育阶段参数率定效

果好的原因是先验信息不够充分^[53]。本研究参照已有文献中参数的先验信息均没有区分生育阶段(表3),这是造成先验信息不充分的一个原因。例如叶面积 LAI 在草莓生长初期随着植株的快速生长叶面积增大较快,花期时叶面积才趋于稳定,如果使用全生育期 LAI 均值反推出的参数作为先验信息,必然会影响到 Bayesian 参数率定结果。本研究中参数 $g_{\max}$ 随生育期变化明显,在草莓生长初期参数值较大,在膨果期骤降至极小值,这一变化规律与青藏高原高山草甸^[19]、西北地区胡杨林^[54] 和美国威斯康星州草地^[55] 相同。因此, D_{50} 、 K_Q 、 Q_{50} 和 $g_{\max}$ 这类参数与植株生理特性和环境辐射关系密切,对作物生育阶段的变化比较敏感,使用区分生育阶段的先验信息进行参数率定效果会更好。

参数 a_2 率定效果最好,在草莓全生育阶段中参数 a_2 后验分布区间都较先验分布区间明显缩小。 $r_{a1}-r_{c3}$ 模型中参数 a_2 的后验分布区间较先验分布区间在 4 个生育阶段分别缩小了 72.32%、88.59%、56.10% 和 86.32%, $r_{a2}-r_{c3}$ 模型分别缩小了 97.65%、92.38%、93.31% 和 98.24%, $r_{a3}-r_{c3}$ 模型分别缩小了 97.65%、92.38%、93.31% 和 98.24%。参照对 D_{50} 、 K_Q 、 Q_{50} 和 $g_{\max}$ 这类参数有关生育阶段敏感性的分析,同样使用不够充分的先验信息却得到了在全生育阶段都较好的参数率定结果,说明参数 a_2 对作物生育阶段的变化不敏感。此外,还可以从

r_{c3} 模型分析得出相同的结论。本研究使用的 r_{c3} 模型中参数 a_2 仅与 VPD 相关, VPD 反映了空气的干燥程度,很明显这一环境因子在简易大棚环境中不随生育阶段发生显著变化。

综上,结合模型模拟精度评价与模型参数不确定性分析,筛选出 $r_{a2}-r_{c3}$ 和 $r_{a3}-r_{c3}$ 两种适宜研究区简易大棚日尺度下的草莓 PM 蒸散模型,由于 $r_{a3}-r_{c3}$ 模型涉及的热传输系数法计算繁琐,故推荐优先使用 $r_{a2}-r_{c3}$ 模型。

3 结 论

(1) Bayesian 参数估计方法使 PM 模型在简易大棚日尺度蒸散估算精度较高,应用 Bayesian 参数估计方法的 6 种 PM 模型中有 5 种在模型率定年和模型检验年同时满足 3 个精度指标。

(2) Bayesian 参数估计方法能有效减小简易大棚日尺度 PM 模型中部分参数的不确定性,在模型 $r_{a2}-r_{c3}$ 中参数 a_2 的后验分布区间较先验分布区间在 4 个生育阶段分别缩小了 97.65%、92.38%、93.31% 和 98.24%,在模型 $r_{a2}-r_{c2}$ 中参数 D_{50} 、 K_Q 、 Q_{50} 和 $g_{\max}$ 在膨果期后验分布区间较先验分布区间分别缩小了 96.44%、56.08%、97.78% 和 99.75%。

(3) 筛选出 $r_{a2}-r_{c3}$ 和 $r_{a3}-r_{c3}$ 2 种适宜简易大棚日尺度蒸散模拟的 PM 模型,其中最优模型为 $r_{a2}-r_{c3}$ 。

参 考 文 献

[1] VILLARREAL-GUERRERO F, KACIRA M, FITZ-RODRIGUEZ E, et al. Simulated performance of a greenhouse cooling control strategy with natural ventilation and fog cooling[J]. Biosystems Engineering, 2012, 111(2):217-228.

[2] COLLA G, ROUPHAEL Y, CARDARELLI M, et al. Water use efficiency and transpiration of greenhouse geranium crop[J]. Acta Horticulturae, 2009,807:271-276.

[3] MONTERO J I, ANTON A, MUNOZ P, et al. Transpiration from geranium grown under high temperatures and low humidities in greenhouses[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 107(4):323-332.

[4] ROUPHAEL Y, COLLA G. Modelling the transpiration of a greenhouse zucchini crop grown under a Mediterranean climate using the Penman-Monteith equation and its simplified version[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 2004, 55(9):931.

[5] LI Q, CAO B, WANG X, et al. Systematic water-saving management for strawberry in basic greenhouses based on the Internet of Things[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2020. DOI: 10.13031/aea.14095.

[6] 吴久江,汪星,李群,等. 简易草莓大棚智慧管理系统设计与性能分析[J]. 农业机械学报,2019,50(12):288-296.

WU Jiujiang, WANG Xing, LI Qun, et al. Design and performance analysis of intelligent management system in simple strawberry greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machine, 2019, 50(12):288-296. (in Chinese)

[7] 李军,姚益平,罗卫红,等. 长江下游防虫网覆盖塑料大棚内小白菜蒸腾模拟[J]. 应用生态学报,2009,20(9):2241-2248.

LI Jun, YAO Yiping, LUO Weihong, et al. Transpiration of *Brassica chinensis* L. in a plastic greenhouse covered with insect-proof nets in low reaches of Yangtze River: a simulation study[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009,20(9):2241-2248. (in Chinese)

[8] 孙怀卫,杨金忠,王修贵. 塑料大棚气流场模拟及作物蒸腾量计算[J]. 农业工程学报,2011,27(11):236-241.

SUN Huaiwei, YANG Jinzhong, WANG Xiugui. Numerical simulation of airflow pattern and calculation of crop transpiration in plastic greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(11):236-241. (in Chinese)

[9] 曹雯. 秋冬季南方单栋塑料温室小气候分析与温湿环境模拟研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2012.

- CAO Wen. The optimal wind speed and CFD simulation in sunlight greenhouse[D]. Nanjing: Nanjing Univeristy of Information Science & Technology, 2012. (in Chinese)
- [10] QIU R, KANG S, DU T, et al. Effect of convection on the Penman – Monteith model estimates of transpiration of hot pepper grown in solar greenhouse[J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, 160(3):163 – 171.
- [11] 赵宝山, 闫浩芳, 张川, 等. Venlo 型温室内参考作物蒸散量计算方法比较研究[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(7):61 – 66.
ZHAO Baoshan, YAN Haofang, ZHANG Chuan, et al. Comparison of different methods for calculating the evapotranspiration in Venlo-type greenhouse[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(7):61 – 66. (in Chinese)
- [12] 王健, 蔡焕杰, 李红星, 等. 日光温室作物蒸发蒸腾量的计算方法研究及其评价[J]. *灌溉排水学报*, 2006, 25(6):13 – 16.
WANG Jian, CAI Huanjie, LI Hongxing, et al. Study and evaluation of the calculation methods of reference crop evapotranspiration in solar-heated greenhouse[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2006, 25(6):13 – 16. (in Chinese)
- [13] 刘浩, 段爱旺, 孙景生, 等. 基于 Penman – Monteith 方程的日光温室番茄蒸腾量估算模型[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(9):208 – 213.
LIU Hao, DUAN Aiwang, SUN Jingsheng, et al. Estimating model of transpiration for greenhouse tomato based on Penman – Monteith equation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(9):208 – 213. (in Chinese)
- [14] BOULARD T, WANG S. Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2000, 100(1):25 – 34.
- [15] 陈新明, 蔡焕杰, 李红星, 等. 温室内作物腾发量计算与验证[J]. *水科学进展*, 2007, 18(6):812 – 815.
CHEN Xinming, CAI Huanjie, LI Hongxing, et al. Calculation and verification of crop evapotranspiration in greenhouse[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(6):812 – 815. (in Chinese)
- [16] THOM A S, OLIVER H R. On Penman's equation for estimating regional evaporation[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1977, 103(436):345 – 357.
- [17] CLARK J S, GELFAND A E. A future for models and data in environmental science[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2006, 21(7):375 – 380.
- [18] CHEN D, WANG X, LIU S, et al. Using Bayesian analysis to compare the performance of three evapotranspiration models for rainfed jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) plantations in the Loess Plateau[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 159:341 – 357.
- [19] 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, 476:42 – 51.
- [20] SONG Yi, JIN Long, ZHU Gaofeng, et al. Parameter estimation for a simple two-source evapotranspiration model using Bayesian inference and its application to remotely sensed estimations of latent heat flux at the regional scale[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 230:20 – 32.
- [21] SAMANTA S. Bayesian analysis for uncertainty estimation of a canopy transpiration model[J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(4):W04424.
- [22] PERRIER A. Etude de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. III évapotranspiration réelle et potentielle des couverts végétaux[J]. *Ann Agronomiques*, 1975, 26:229 – 245.
- [23] LHOMME J P, MONTENY B. Theoretical relationship between stomatal resistance and surface temperatures in sparse vegetation[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2000, 104(2):119 – 131.
- [24] JACKSON R D, KUSTAS W P, CHOUDHURY B J. A reexamination of the crop water stress index[J]. *Irrigation Science*, 1988, 9(4):309 – 317.
- [25] 陈新明, 蔡焕杰, 李红星, 等. 温室大棚内作物蒸发蒸腾量计算[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(2):317 – 321.
CHEN Xinming, CAI Huanjie, LI Hongxing, et al. Calculation of crop evapotranspiration in greenhouse[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(2):317 – 321. (in Chinese)
- [26] BAILEY B J, MONTERO J I, BIEL C, et al. Transpiration of ficusbenjamina: comparison of measurements with predictions of the Penman – Monteith model and a simplified version[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 1993, 65(3/4):229 – 243.
- [27] MCADAMS W H. Heat transmission[M]. 3rd. New York: McGraw-Hill, 1954.
- [28] STANGHELLINI C. Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management[D]. Netherlands: Wageningen, 1987.
- [29] MORILLE B, MIGEO C, BOURNET P E. Is the Penman – Monteith model adapted to predict crop transpiration under greenhouse conditions? Application to a New Guinea Impatiens crop[J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, 152(2):80 – 91.
- [30] YAN Haofang, ZHAO Baoshan, ZHANG Chuan, et al. Parametrization of aerodynamic and canopy resistances for modeling evapotranspiration of greenhouse cucumber[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 262(11):370 – 378.
- [31] 闫浩芳, 赵宝山, 张川, 等. Penman – Monteith 模型模拟 Venlo 型温室黄瓜植株蒸腾[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(8):157 – 165.
YAN Haofang, ZHAO Baoshan, ZHANG Chuan, et al. Estimating cucumber plants transpiration by Penman – Monteith model in Venlo-type greenhouse[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(8):157 – 165. (in Chinese)
- [32] JOLLIET O, BAILEY B J. The effect of climate on tomato transpiration in greenhouses: measurements and models comparison[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 1992, 58(1 – 2):43 – 62.

- [33] LEUNING R, ZHANG Y Q, RAJAUD A, et al. A simple surface conductance model to estimate regional evaporation using MODIS leaf area index and the Penman – Monteith equation[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(10):652 – 655.
- [34] JARVIS P G. The Interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1976, 273(927):593 – 610.
- [35] BALL J T, WOODROW I E, BERRY J A. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions[M]//*Progress in Photosynthesis Research*, 1987: 221 – 224.
- [36] 张宝忠, 刘钰, 许迪, 等. 基于夏玉米叶片气孔导度提升的冠层导度估算模型[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(5):80 – 86.
ZHANG Baozhong, LIU Yu, XU Di, et al. Estimation of summer corn canopy conductance by scaling up leaf stomatal conductance[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(5):80 – 86. (in Chinese)
- [37] MONTEITH J L. Light distribution and photosynthesis in field crops[J]. *Annals of Botany*, 1965, 1(1):17 – 37.
- [38] TURNER N C, GOLLAN E D S. The responses of stomata and leaf gas exchange to vapour pressure deficits and soil water content. II. In the mesophytic herbaceous species *helianthus annuus*[J]. *Oecologia*, 1985, 65(3):348 – 355.
- [39] 唐凤德, 武耀祥, 韩士杰, 等. 长白山阔叶红松林叶片气孔导度与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2008, 28(11):5649 – 5655.
TANG Fengde, WU Yaoxiang, HAN Shijie, et al. Relationship of stomatal conductance of leaf with environmental factors in broad-leaved Korean pine forest at Changbai Mountain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11):5649 – 5655. (in Chinese)
- [40] HOFSTRA G, HESKETH J D. The effect of temperature on stomatal aperture in different species[J]. *Canadian Journal of Botany*, 1969, 47(8):1307 – 1310.
- [41] CHEN D X, LIETH J H. Two-dimensional model of water transport in the root zone and plant for container-grown chrysanthemum[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 1992, 59(3 – 4):129 – 148.
- [42] ORTEGA-FARIA S, POBLETE-ECHEVERRÍA 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.
- [43] 魏征, 刘钰, 许迪, 等. 基于叶片气孔导度提升的冬小麦冠层阻抗估算模型的应用和对比[J]. *科学通报*, 2013, 58(18):1775 – 1783.
- [44] KELLIHER F M, LEUNING R, RAUPACH M R, et al. Maximum conductances for evaporation from global vegetation types [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 73(1 – 2):1 – 16.
- [45] LI Y, SPERRY J S, TANEDA H, et al. Evaluation of centrifugal methods for measuring xylem cavitation in conifers, diffuse-and ring-porous angiosperms[J]. *New Phytologist*, 2008, 177(2):558 – 568.
- [46] LEUNING R, ZHANG Y Q, RAJAUD A, et al. A simple surface conductance model to estimate regional evaporation using MODIS leaf area index and the Penman – Monteith equation[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(10):652 – 655.
- [47] 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.
- [48] MARCEL V O, JONATHAN R, RON S. Bayesian calibration of process-based forest models: bridging the gap between models and data[J]. *Tree Physiology*, 2005(7):915 – 927.
- [49] GONG X, LIU H, SUN J, et al. A proposed surface resistance model for the Penman – Monteith formula to estimate evapotranspiration in a solar greenhouse[J]. *Journal of Arid Land*, 2017(4):1 – 17.
- [50] 杨振超. 日光温室内最佳风速指标与 CFD 模拟[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2006.
- [51] 姜寒冰, 张传伟, 张玉翠, 等. 作物气孔导度模型研究进展及应用现状[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(12):7 – 15.
JIANG Hanbing, ZHANG Chuanwei, ZHANG Yucui, et al. Crop stomatal conductance model: research progress and application status[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(12):7 – 15. (in Chinese)
- [52] CHEN D, HSU K, DUAN X, et al. Bayesian analysis of jujube canopy transpiration models: does embedding the key environmental factor in Jarvis canopy resistance sub-model always associate with improving transpiration modeling? [J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 234:106 – 112.
- [53] PATRICK L D, OGLE K, BELL C W, et al. Physiological responses of two contrasting desert plant species to precipitation variability are differentially regulated by soil moisture and nitrogen dynamics[J]. *Global Change Biology*, 2010, 15(5):1214 – 1229.
- [54] ZHUG F, LI X, SUY H, et al. Seasonal fluctuations and temperature dependence in photosynthetic parameters and stomatal conductance at the leaf scale of *Populus euphratica* Oliv. [J]. *Tree physiology*, 2011, 31(2):178 – 195.
- [55] EWERS B E, MACKAY D S, GOWER S T, et al. Tree species effects on stand transpiration in northern Wisconsin[J]. *Water Resources Research*, 2002, 38(7):8-1 – 8-11.