doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.08.032

基于改进 S－W 与结构方程模型的干旱区枣园蒸散特征分析

乔　英[1,2]　马英杰[1]　辛明亮[1]

(1.新疆农业大学水利与土木工程学院,乌鲁木齐 830052;2.新疆理工学院建筑工程学院,阿克苏 843100)

摘要:为准确量化蒸散及其组分、分析蒸散的控制机制,利用改进的 Shuttleworth－Wallace 模型(S－W)对干旱区滴灌枣园的蒸散量、植株蒸腾量进行模拟,使用两年的涡度相关系统、针式茎流计数据对模型进行参数率定及验证,并利用结构方程模型(Structural equation model,SEM)分析枣园蒸散与其影响因子之间的关系。结果表明:S－W 模型在干旱区枣园有较好的适用性,适宜的模型参数 a_1 为 6.944 5、g_0 为 0.043 9、b_2 为 4.604 1、b_3 为 957.110 6;蒸散量模拟精度为:均方根误差(RMSE)为 0.62～0.76 mm/d,回归系数 b 为 0.77～0.88,决定系数 R^2 为 0.95～0.97,一致性指数 d 为 0.92～0.94,模型效率纳什系数(EF)为 0.70～0.81,均方根误差与观测值标准差比率(RSR)为 0.44～0.55。SEM 模型显示,6 个测量因子能够解释 89% 的植株蒸腾量、84% 的土壤蒸发量,植株蒸腾量对土壤蒸发量的标准化总影响系数为 －0.70。对植株蒸腾量影响最大的因子是叶面积指数,标准化总影响系数为 0.52;其次是气温,标准化总影响系数为 0.44。对土壤蒸发量影响最大的因子是净辐射,标准化总影响系数为 0.50,标准化直接影响系数为 0.66;其次是土壤表层含水率,标准化总影响系数为 0.49,标准化直接影响系数为 0.69。S－W 模型是估算干旱区枣园蒸散量的有效工具,基于 SEM 模型的蒸散特征分析可为干旱区农业节水提供新的思路。

关键词:枣园;干旱区;蒸散量;相关分析;改进 Shuttleworth－Wallace 模型;结构方程模型

中图分类号:S161.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2021)08-0307-11　　**OSID**:

Analysis of Evapotranspiration Characteristics of *Ziziphus jujuba* Mill. Orchards in Arid Areas Based on Improved S－W and Structural Equation Model

QIAO Ying[1,2]　MA Yingjie[1]　XIN Mingliang[1]

(1. *College of Water Conservancy and Civil Engineering*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi* 830052, *China*
2. *College of Architectural Engineering*, *Xinjiang Institute of Technology*, *Aksu* 843100, *China*)

Abstract: Accurate quantification of evapotranspiration and the analysis of its control factors are of vital importance for agricultural water conservation and ecological-environmental protection. The improved Shuttleworth－Wallace (S－W) model was introduced for simulating evapotranspiration and transpiration in drip-irrigated jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) orchards in arid areas. The simulations of the S－W model were verified against measured data obtained from the eddy covariance system and measurements of a pin-type stem flowmeter for two consecutive years. The relationships between evapotranspiration in jujube orchards and influencing factors were analyzed by using the structural equation model (SEM). The S－W model showed good performance in simulating evapotranspiration and transpiration in arid areas under parameter value with a_1 of 6.944 5, g_0 of 0.043 9, b_2 of 4.604 1, b_3 of 957.110 6, achieving root mean square error (RMSE) of 0.62 ～ 0.76 mm/d, regression coefficient (b) of 0.77 ～ 0.88, determination coefficient (R^2) of 0.95～0.97, index of agreement (d) of 0.92～0.94, efficiency of simulation (EF) of 0.70～0.81, ratio of RMSE to observations standard deviation (RSR) of 0.44～0.55. The results of SEM indicated that six factors explained 84% and 89% of observed variations in soil evaporation and transpiration, respectively. The coefficient of influence of plant transpiration of soil evaporation was －0.70. Leaf area index had the highest effect on plant transpiration, with total influence coefficient of 0.52, followed by air temperature with total influence coefficient of 0.44 and no indirect

收稿日期:2021－01－12　修回日期:2021－06－05

基金项目:国家自然科学基金项目(52069027)、高校科研计划项目(XJEDU2017T004)和院士工作站基金项目(2020.D－003)

作者简介:乔英(1983—),女,博士生,新疆理工学院教员,主要从事农业水资源高效利用研究,E-mail:xndns024@126.com

通信作者:马英杰(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事灌溉排水理论与技术研究,E-mail:xj-myj@163.com

influence. Net radiation had the highest effect on soil evapotranspiration, followed by soil surface water content, with total influence coefficients of 0.50 and 0.49 and direct influence coefficients of 0.66 and 0.69, respectively. The results of this model confirmed that the S－W model can be served as an efficient tool for estimating evapotranspiration in jujube orchards in arid areas, whereas SEM may provide a perspective on agricultural water conservation in arid areas.

Key words: *Ziziphus jujuba* Mill. orchards; arid area; evapotranspiration; correlation analysis; improved Shuttleworth－Wallace model; structural equation model

0 引言

干旱、半干旱区占全球陆地面积的 15% 左右[1-2]，我国干旱、半干旱区占国土面积的 40% 左右[3]。在干旱环境系统中能量和物质平衡处于一种脆弱的平衡态[3]，该区域是气候变化的敏感带。干旱区农业离不开灌溉，干旱区的农业用水量约占总用水量的 90%[4]，但是灌溉用水 90% 以上用于蒸散(Evapotranspiration，ET)[5]。因此，准确测量及估算干旱区农作物的蒸散量及其组分(土壤蒸发量和植株蒸腾量)对农业节水、生态环境保护具有重要意义[6]。

蒸散量的测定需要较为昂贵的实验设备及专业人员的长期维护，其人力、物力成本均较高[7-8]。数学模拟估算是很好的解决途径[9-10]。SHUTTLEWORTH 等[11]在 Penman－Monteith 模型(P－M)基础上建立了双源耦合 Shuttleworth－Wallace(S－W)模型，相较于 P－M 模型，S－W 模型可区分土壤蒸发量(Soil evaporation，E)和植株蒸腾量(Plant transpiration，T)[12]，而改进的 S－W 模型可解决估算冠层气孔导度的问题[13]，在站点或生态系统尺度上能很好地估算和分离 E、T[13-14]。但改进的 S－W 模型未在干旱区人工经济林应用中得到验证，而且模型各因子之间的关系有待进一步研究。

以往研究大多是通过比较两因子之间的决定系数[15-16]，或者利用多元回归等传统统计方法[14]来分析蒸散的主要影响因子，这些方法只能给出单个自变量对因变量的净影响，而忽略了自变量之间的相关关系[17]，会导致研究结果不一致甚至完全相反[18]。结构方程模型(SEM)是一种整合了因素分析与路径分析的多变量统计方法[19]，可同时发掘研究系统中多个因子之间潜在的、相互影响的关系[20]。近些年，SEM 被广泛应用于社会经济学和生态学领域中[21]，但是在农业水土方面的应用较少。涡度相关系统和茎流计测定的数据已成为检验各种模型模拟或估算精度的标准[22-23]。本文使用 2 年涡度相关系统与茎流计验证 S－W 模型在干旱区枣园的适用性，并利用 SEM 分析土壤蒸发、植株蒸腾与测量因子之间的关系，以探讨土壤蒸发、植株蒸腾的控制机制，以期为农业节水提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 S－W 模型

1.1.1 模型简介

S－W 模型将植被和土壤视为两个独立却又相互作用的水汽源，总水汽源可用潜热通量 λET 表示为[11]

$$\lambda ET = \lambda T + \lambda E = C_C P_C + C_S P_S \tag{1}$$

其中

$$T = P_C = \frac{\Delta R + \dfrac{\rho c_p D - \Delta r_a^c R_S}{r_a^a + r_a^c}}{\Delta + \gamma\left(1 + \dfrac{r_s^c}{r_a^a + r_a^c}\right)} \tag{2}$$

$$E = P_S = \frac{\Delta R + \dfrac{\rho c_p D - \Delta r_a^s (R - R_S)}{r_a^a + r_a^s}}{\Delta + \gamma\left(1 + \dfrac{r_s^s}{r_a^a + r_a^s}\right)} \tag{3}$$

$$C_C = \frac{1}{1 + \dfrac{\rho_c \rho_a}{\rho_s(\rho_c + \rho_a)}} \tag{4}$$

$$C_S = \frac{1}{1 + \dfrac{\rho_s \rho_a}{\rho_c(\rho_s + \rho_a)}} \tag{5}$$

$$\rho_a = (\Delta + \gamma) r_a^a \tag{6}$$

$$\rho_c = (\Delta + \gamma) r_a^c + \gamma r_s^c \tag{7}$$

$$\rho_s = (\Delta + \gamma) r_a^s + \gamma r_s^s \tag{8}$$

式中 ET——模拟蒸散量，mm/d

λ——水的汽化潜热，MJ/kg

P_C——模拟植株蒸腾量，mm/d

P_S——模拟土壤蒸发量，mm/d

C_C——植株蒸腾的比例系数

C_S——土壤蒸发的比例系数

Δ——饱和水气压与温度关系曲线的斜率，kPa/K

c_p——空气定压比热容，取 1.013×10^{-3} J/(kg·K)

R——冠层以上可用输入能量，MJ/(m²·d)

R_S——土壤表面以上可用输入能量，MJ/(m²·d)

D——饱和水气压差，kPa

ρ——空气密度，kg/m^3

γ——湿度计常数，kPa/K

ρ_c、ρ_a、ρ_s——中间变量

r_a^s——地表与冠层高度之间的空气动力学阻力，s/m

r_a^a——冠层高度与参考高度之间的空气动力学阻力，s/m

r_a^c——冠层边界层阻力，s/m

r_s^c——冠层气孔阻力，s/m

r_s^s——土壤表面阻力，s/m

S－W 模型的重点是计算 5 个阻力参数，其中空气动力学阻力（r_a^s、r_a^a）、冠层边界层阻力（r_a^c）使用 SHUTTLEWORTH 等[11]推荐的公式计算。

冠层气孔阻力 r_s^c 使用 BALL 等[24]推荐的公式计算，即

$$r_s^c = \frac{1}{g_0 + \dfrac{a_1 P_n h_s}{C_s}} \tag{9}$$

式中　P_n——净光合速率，μmol/（m^2·s）

h_s——叶表面相对湿度，%

C_s——叶片表面 CO_2 质量浓度，mg/m^3

a_1、g_0——需要率定和验证的经验参数

林家鼎等[25]认为土壤表面阻力 r_s^s 可估计为土壤含水率的函数，即

$$r_s^s = b_1 \left(\frac{\theta_s}{\theta}\right)^{b_2} + b_3 \tag{10}$$

式中　θ_s——土壤饱和含水率，m^3/m^3

θ——土壤实际含水率，m^3/m^3

b_1——经验参数，取 3.5

b_2、b_3——需要率定和验证的经验参数

综上，S－W 模型中需要率定的参数为 a_1、g_0、b_2、b_3。

1.1.2　模型参数率定

使用蒙特卡洛方法率定 S－W 模型参数，具体参照文献[13]，计算步骤为：①根据前人研究结果，每个参数选定一个大致区间。②将给定的参数区间等步长分成 10 000 份并设置成均匀分布，从参数集中随机抽样 10 000 次进行模拟。③用线性回归函数 $y = kx$ 及决定系数 R^2 比较所有模拟结果和实测值。④根据 k 及 R^2 缩小参数范围，重复步骤②、③，选出 20 个最优参数（k 及 R^2 最接近 1 的参数），假设这 20 个参数的建模性能相同，求其平均值作为最佳拟合参数。

1.1.3　模型模拟评价指标

采用均方根误差（Root mean square error，RMSE）、平均绝对误差（Mean absolute error，MAE）、回归系数（Regression coefficient，b）、决定系数（Determination coefficient，R^2）、一致性指数（Index of agreement，d）[26]、模型效率纳什系数（Efficiency of simulation，EF）和均方根误差与观测值标准差比率（RMSE-observations standard deviation ratio，RSR）评价 S－W 模型模拟效果。其中 EF、RSR 为标准化的误差统计量，RSR 是均方根误差对观测值标准差的标准化形式，消除了因数据类型不同对误差判断的影响[27]。EF 范围为（$-\infty$，1），负值表示观测值的平均值高于模拟值的平均值，当 EF 在[0.75，1]时，模拟效果极好；当 EF 在[0.65，0.75）时，模拟效果较好；当 EF 在[0.5，0.65）时，模拟效果一般；当 EF 小于 0.5 时，模拟结果不可接受。当 RSR 在[0，0.5]时，模拟效果极好；当 RSR 在（0.5，0.6]时，模拟效果较好；当 RSR 在（0.6，0.7]时，模拟效果一般；当 RSR 大于 0.7 时，模拟结果不可接受[27]。综上，RMSE、MAE、RSR 越接近 0 表示模型模拟效果越好，而 b、R^2、d、EF 越接近 1 表示模型模拟效果越好。

1.2　SEM 模型

SEM 模型基于研究者的先验知识预先设定因子间的依赖关系，能够判别各因子之间的关系强度，可获得自变量对因变量影响的直接效果、间接效果和总效果[28]，还能对整体模型进行拟合和判断，可更全面地了解研究系统[29]。本文使用 SEM 模型研究土壤蒸发、植株蒸腾与测量因子之间的直接影响和间接影响，运用 Amos 22.0 软件构建结构方程模型，采用极大似然估计。根据文献[16，18，30]的研究，在 S－W 模型的输入变量中选取气温（Air temperature，T_a）、相对湿度（Relative humidity，R_H）、净辐射（Net radiation，R_n）、参考高度的风速（Wind speed at reference height，u）、土壤表层含水率（Soil surface water content，S_W）、叶面积指数（Leaf area index，L）构建初始模型。在初始模型中，假设所有因子之间都相互影响，包括土壤蒸发量与植株蒸腾量（即饱和模型）；然后对饱和模型进行违规估计检验、拟合优劣指标检验及模型修订指标检验，将没有达到显著水平的影响路径删除（$P > 0.005$ 的路径），或者基于不同变量之间的残差协方差来增加变量关系，选出有显著作用的因子和路径，不断地修改初始模型直至模型拟合符合标准。利用卡方 χ^2（当 $P > 0.05$ 时说明模型拟合较好）、拟合指数（Comparative fit index，CFI，当 CFI 大于 0.95 时模型拟合较好）、渐进残差均方和平方根（Root mean square error of approximation，RMSEA，当 RMSEA 小于 0.05 时模型拟合较好）评估整体模型[28]，并增加模型绝对适配度、增值适配度、简约适配度指标评价修正模型。

1.3 研究区概况

研究区(图 1)位于新疆维吾尔自治区阿克苏市农业示范园(东经 80°22′,北纬 41°8′,海拔 1 198 m),试验区面积约 160 hm^2,属于典型的温带大陆性气候。多年平均太阳总辐射 490.01 MJ/(m^2·d),多年平均降水量 68.4 mm,多年平均气温 11.2℃,年均蒸发量 1 993 mm[31],地下水埋深大于 10 m,土壤质地为砂土。

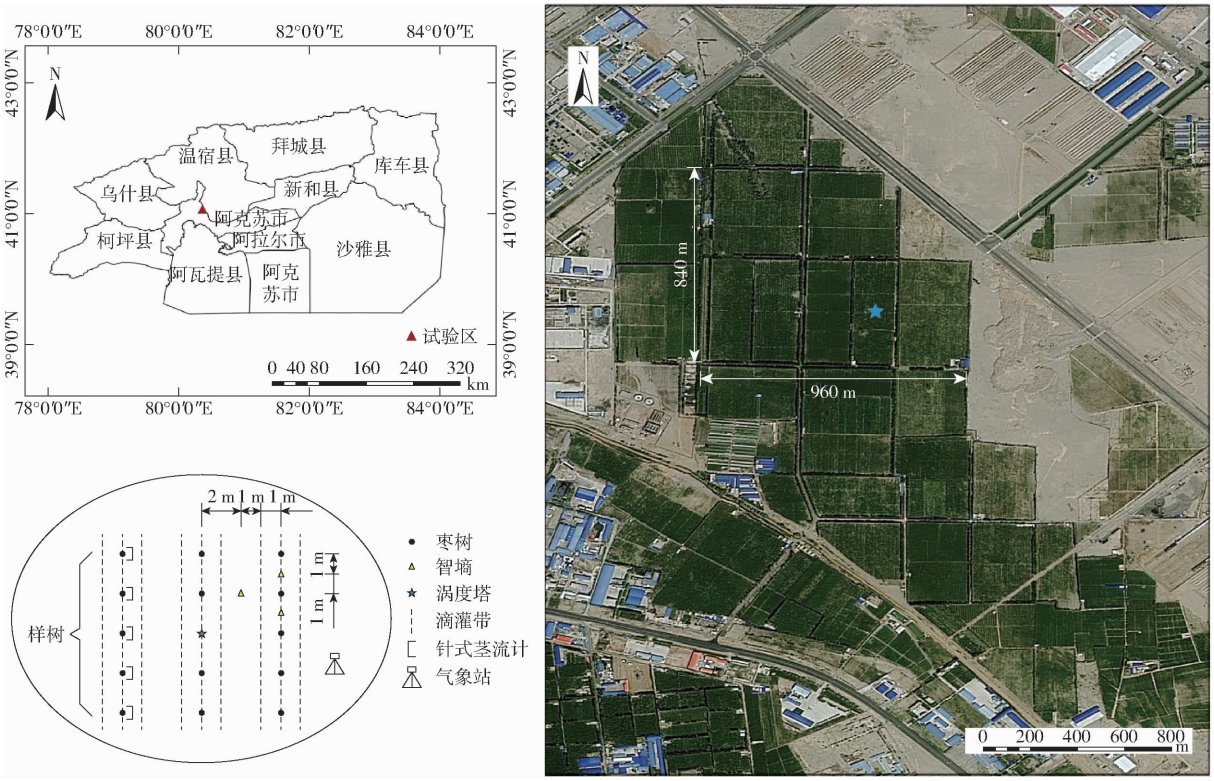

图 1 研究区位置及仪器布置图

Fig. 1 Location of research area and instrument layout

试验作物为 18 年生灰枣树,株行距 2 m×4 m,人工修剪控制冠层高度为(4±0.12)m。采用井水滴灌,沿枣树行间方向布设 3 根滴灌带(图 1)。使用滴灌专用肥随水施肥(氮、磷、钾质量比为 2∶1∶2),单次施肥量 37 kg/hm^2,施肥时间为第 1 次灌水至 8 月下旬。枣树生育期内灌溉制度及施肥制度见表 1。

表 1 枣树生育期内灌溉制度及施肥制度

Tab. 1 Irrigation schedule and time of fertilization during growth period of jujube

年份	月份	灌溉量/mm	灌溉次数	施肥次数	年份	月份	灌溉量/mm	灌溉次数	施肥次数
2018	4	32.71	1	1	2019	4	54.38	2	1
	5	120.96	6	3		5	130.50	4	2
	6	206.94	6	3		6	130.50	6	3
	7	178.73	7	3		7	170.38	6	3
	8	162.90	6	2		8	192.13	6	2
	9	112.24	5	0		9	134.13	5	0
合计		814.48	31	12	合计		812.02	29	11

注:10 月没有灌溉。

1.4 观测项目

气象数据:采用 Watchdog 小型自动气象站(Watchdog,Spectrum,美国)连续监测降水量、相对湿度、太阳辐射、气温、风速等,每 30 min 输出 1 组数据。

蒸散量、土壤热通量:采用涡度协方差观测系统观测蒸散量、土壤热通量,主要观测仪器包括:开路涡度协方差监测系统(IRGASON 型,Campbell Scientific,美国)测量水汽浓度、三维风速,采样频率 10 Hz,观测高度 6 m;HFP 01 型土壤热通量板(Campbell Scientific,美国)测量土壤热通量,埋于地表以下 8 cm;利用 CR 3000 型数据采集器(Campbell Scientific,美国)采集涡度系统的所有数据,每 30 min 输出一组数据。涡度数据使用 Loggernet 4.5 软件处理,缺失数据使用 R 语言 REddyProc 包插补,

插补数据进行交叉验证。

植株蒸腾量：选择 5 棵长势均一的样树安装针式茎流计（SF－G 型，Dynamax Inc.，美国），利用 CR 1000 型数据采集器自动监测，每 30 min 记录一组数据。2018 年植株蒸腾量数据采集时间为 5 月7 日—9 月 23 日，2019 年为 4 月 10 日—10 月 20 日。因仪器出现故障，2019 年 7 月 27 日—8 月 19 日的数据缺失。

叶面积指数：使用 HemiView 型数字植物冠层分析仪（Delta－T，英国）测量叶面积指数 L（m^2/m^2），对 5 棵样树拍照并用 HemiView 2.1 SR 4 软件计算叶面积指数。2018 年从 5 月 28 日开始每月测量一次，2019 年从5 月 8 日开始每半个月测量一次，利用实测叶面积指数做拟合曲线得到每日叶面积指数，结果见图 2。

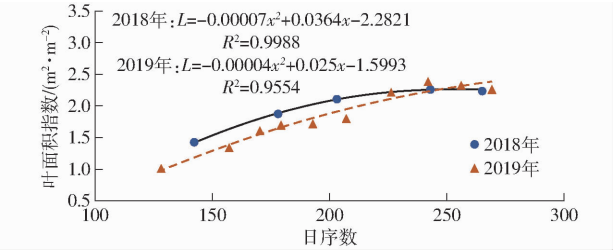

图 2　枣树生育期叶面积指数变化曲线

Fig. 2　Change curves of leaf area index during growth period of jujube

土壤含水率：使用智墒（ET100 型，Insentek，中国）监测土壤含水率。在枣树行间布置 1 个智墒，株间布置 2 个智墒（图 1），测量地表下 10 cm 的土壤含水率，每 30 min 输出一组数据。

2　结果与分析

2.1　S－W 模型参数率定与验证

使用 2018 年实测蒸散量数据率定 S－W 模型参数，最佳拟合参数为：a_1 为 6.944 5，g_0 为 0.043 9，b_2 为 4.604 1，b_3 为 957.110 6。将 S－W 模型模拟蒸散量与实测值作图（图 3a），评价 2018 年蒸散量模拟效果，RMSE 为 0.62 mm/d，MAE 为 0.52 mm/d，b 为 0.77，R^2 为 0.97，d 为 0.94，EF 为 0.81（模拟效果极好），RSR 为 0.44（模拟效果极好），所有评价指标均在可接受范围内。

将率定参数代入 S－W 模型，使用 2019 年的实测蒸散量数据验证，同时将模拟值与实测值作图（图 3b），并评价模拟效果，RMSE 为 0.76 mm/d，b 为 0.88，R^2 为 0.95，d 为 0.92，EF 为 0.70（模拟效果较好），RSR 为 0.55（模拟效果较好），所有评价指标均在合理范围内。故 S－W 模型在干旱区模拟滴灌枣园蒸散量精度高，可用来估算干旱区滴灌枣园蒸散量。

2.2　S－W 模型模拟的植株蒸腾量

使用针式茎流计实测值验证 S－W 模型模拟植株蒸腾量的精度。使用 2.1 节得到的参数代入 S－W 模型进行植株蒸腾量模拟，并与 2 年实测数据对比（图 4），模拟精度评价指标分别为：RMSE 为 0.46、0.51 mm/d，MAE 为 0.36、0.41 mm/d，b 为 1.08、1.04，R^2 为 0.97、0.95，d 为 0.90、0.94，EF 为 0.50（模拟效果一般）、0.71（模拟效果较好），RSR

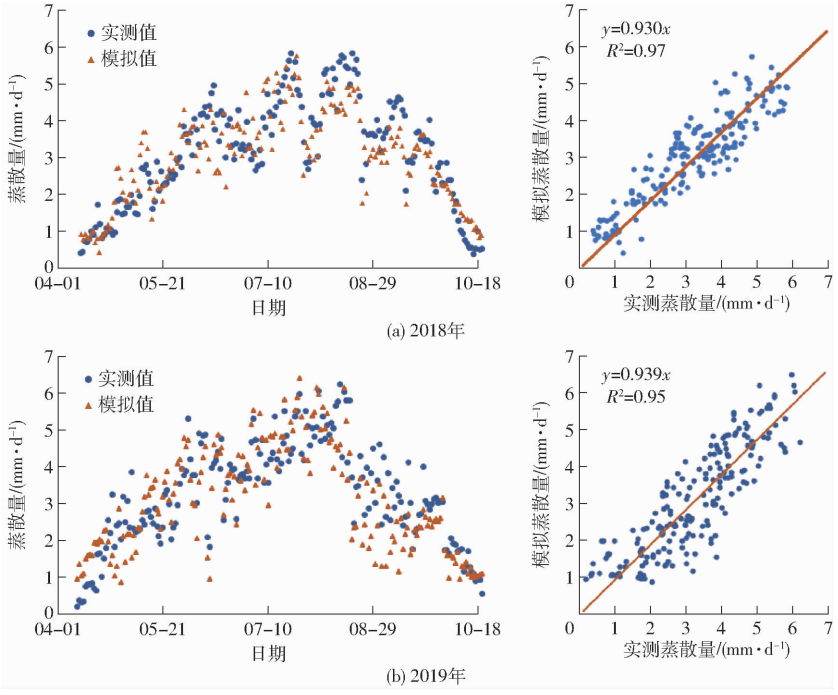

图 3　S－W 模型蒸散量模拟值与实测值对比

Fig. 3　Comparison between simulated and measured evapotranspiration values of S－W model

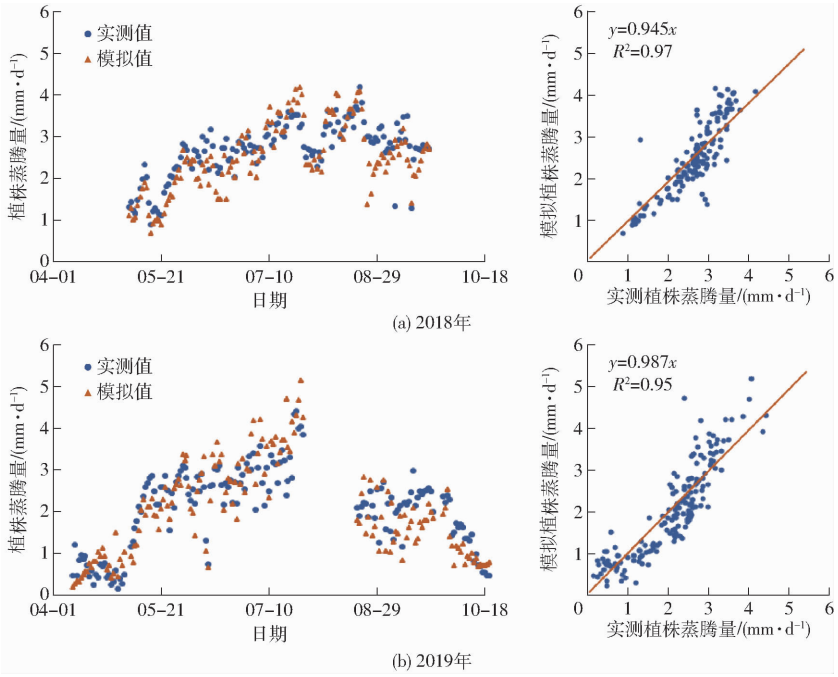

图 4 S－W 模型植株蒸腾量模拟值与实测值对比

Fig. 4 Comparison between simulated and measured plant transpiration values of S－W model

为 0.70(模拟效果一般)、0.54(模拟效果较好),所有评价指标均在合理范围内。这说明 S－W 模型可在干旱区滴灌枣园模拟植株蒸腾量。

2.3 土壤蒸发、植株蒸腾控制机制分析

2.3.1 生育期环境因子分析

根据试验观测数据,对 2 年枣树生育期内环境因子(气温、相对湿度、净辐射、参考高度的风速、土壤表层含水率和叶面积指数)进行统计分析,各个因子的统计参数见表 2。在观测期间,日平均气温在 5.61 ~ 29.81℃间变化,其中 10 月的月平均气温最低(13.01℃),7 月的月平均气温最高(24.63℃),6—8 月的月平均气温在 20℃以上。日平均相对湿度在 6.01% ~ 87.40% 间波动。净辐射在 0.08 ~ 20.26 MJ/(m²·d)间变化,生育期内呈单峰曲线变动,峰值在 7 月。参考高度的风速在生育期内呈下降趋势,月平均最大值为 4 月(0.99 m/s),月平均最小值为 9 月(0.69 m/s)。枣园 10 cm 深度的土壤含水率在 0.05 ~ 0.30 m^3/m^3 之间变化,平均值为 0.17 m^3/m^3。在枣树生育后期控水,9 月平均土壤表层含水率为 0.10 m^3/m^3,10 月平均土壤表层含水率为 0.07 m^3/m^3,其他生育期为充分灌溉。

表 2 枣树生育期各环境因子统计分析

Tab. 2 Statistical analysis of various environmental factors during growth period of jujube

环境因子	最大值	最小值	平均值	中位数	标准差
气温/℃	29.81	5.61	20.06	20.48	4.57
相对湿度/%	87.40	6.01	47.13	45.59	18.82
净辐射/(MJ·m⁻²·d⁻¹)	20.26	0.08	11.45	11.73	4.34
参考高度的风速/(m·s⁻¹)	1.78	0.10	0.80	0.76	0.24
土壤表层含水率/(m³·m⁻³)	0.30	0.05	0.17	0.17	0.07
叶面积指数/(m²·m⁻²)	2.50	0.12	1.68	1.87	0.60

2.3.2 初始模型的修正及参数估计

对初始模型进行分析得到各因子之间的路径系数(图 5a、表 3)。图 5 中单向箭头由自变量指向因变量;双向箭头表示两因子之间的相关关系。线上的数值为标准化路径系数,表示自变量对因变量影响的大小;数值的正负表示相关关系的正负。e 表示误差变量;方框下数字表示自变量对因变量的总解释率[28]。初始模型中虚线表示该路径不显著,在模型修正时删除;修正模型中虚线表示该路径不显著,实线表示该路径显著。初始模型的正态检验临界比率(Critical ratio, CR)为 5.89,大于 1.96,说明初始模型数据中存在异常值。初始模型数据为 386 组(2018 年 192 组,2019 年 194 组),通过计算每组数据远离群体重心的距离来判别异常值,删除 17 组异常值后 CR 为 1.70,小于 1.96,符合正态分布假设。初始模型的违犯估计标准化误差(Standard

error，SE）均为正值，符合要求。将没有达到显著水平的影响路径删除，或者将不合理的影响路径删除。参考高度的风速对植株蒸腾量的标准化系数为 0.005，且显著性概率 P 为 0.809，大于 0.05（未达到 0.05 显著水平）；参考高度的风速对土壤蒸发量的标准化系数为 －0.010，且 P 为 0.660，大于 0.05（未达到 0.05 显著水平）；参考高度的风速对植株蒸腾量、土壤蒸发量的影响均较小，故删除参考高度的风速到植株蒸腾量、土壤蒸发量的路径。同时筛选因子中的相关关系，将标准化系数中较小、未达到显著水平的路径删除，删除 $P > 0.005$ 的相关关系，得到修正模型（图 5b）。

修正后模型各因子之间的路径系数和显著性见表 3，可见显著性除了叶面积指数对土壤蒸发量（$P = 0.002$）、叶面积指数与相对湿度（$P = 0.002$），其他均小于 0.001；标准化路径系数的绝对值均大于 0.1。修正模型卡方 χ^2 为 12.342，自由度（Degree of freedom，DF）为 7，P 为 0.089 8，大于 0.05，表示该模型与数据拟合适度；χ^2 与自由度比值为 1.763（此数值介于（1，2）间，表示假设模型与样本数据的契合度可接受，符合模型简约适配程度）；近似误差均方根（RMSEA）为 0.046，小于 0.05，表示模型适配度非常好；且模型绝对适配度统计量、增值适配度统计量、简约适配统计量的各项检验指标均达到标准（表 4），故修正模型与数据适配良好。

2.3.3　土壤蒸发量、植株蒸腾量与影响因子的耦合分析

为了更好地对模型中各影响因子的重要性进行比较，将修正后的模拟结果整理得到表 5，标准化总影响系数是标准化直接影响系数与标准化间接影响系数之和[20]。SEM 模型显示，6 个测量因子对植株蒸腾量的总解释率为 89%，对土壤蒸发量的总解释率为 84%；植株蒸腾量对土壤蒸发量的总影响系数为 －0.70，呈负相关关系。测量因子对植株蒸腾量

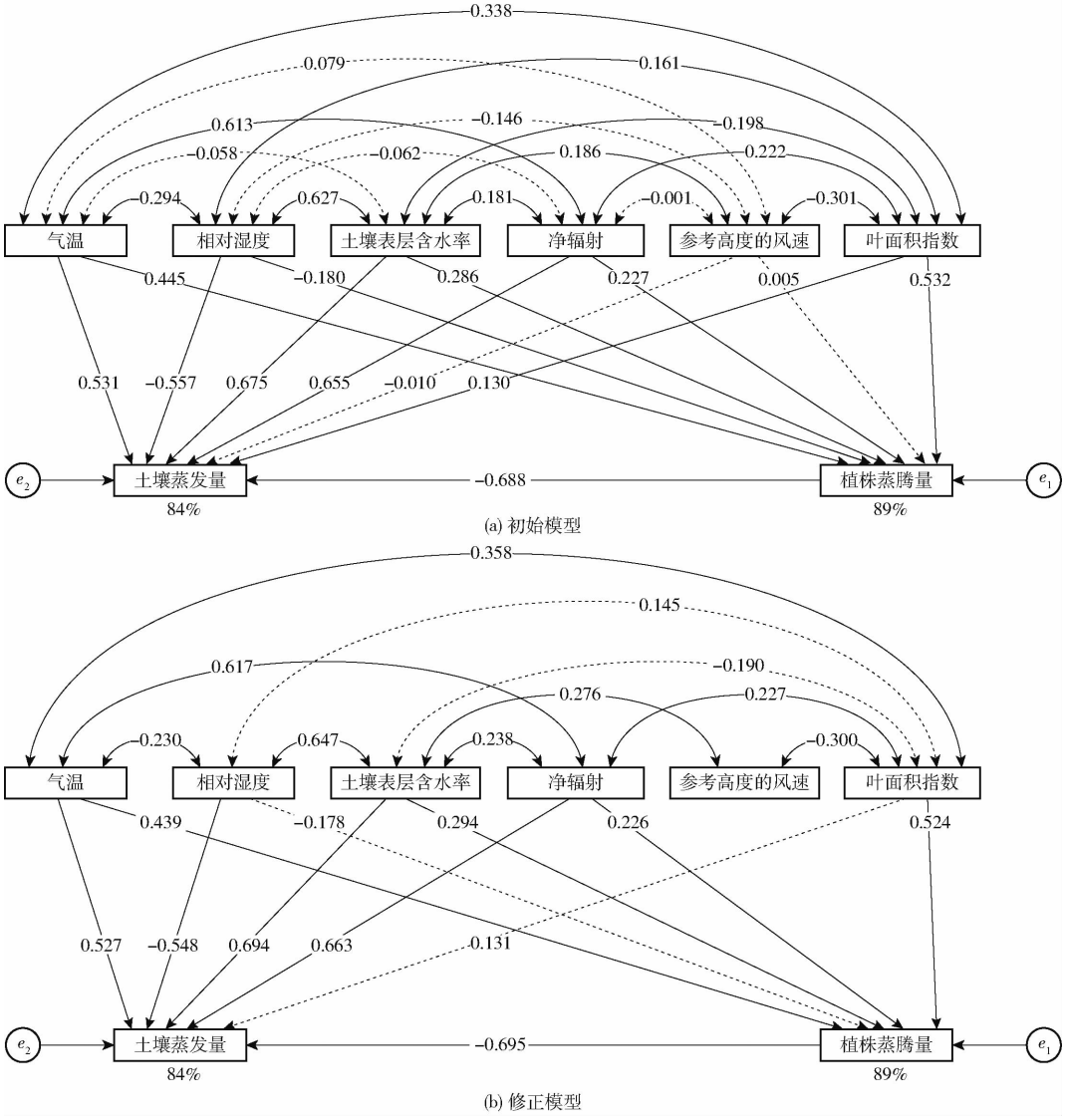

图 5　土壤蒸发量、植株蒸腾量与测量因子的结构方程模型路径图

Fig. 5　Path diagrams of structural equation model for soil evaporation, plant transpiration and measurement factors

表 3 因子之间标准化系数及显著性

Tab. 3 Standardized coefficient and significance between factors

初始模型						修正模型					
变量	关系	变量	标准化系数	标准化误差	显著性	变量	关系	变量	标准化系数	标准化误差	显著性
T	←	T_a	0.445	0.006	***	T	←	T_a	0.439	0.006	***
T	←	R_H	-0.180	0.002	***	T	←	R_H	-0.178	0.002	***
T	←	S_W	0.286	0.416	***	T	←	S_W	0.294	0.401	***
T	←	R_n	0.227	0.006	***	T	←	R_n	0.226	0.006	***
T	←	u	0.005	0.100	0.809	T	←	L	0.524	0.041	***
T	←	L	0.532	0.042	***	E	←	S_W	0.694	0.199	***
E	←	S_W	0.675	0.205	***	E	←	R_n	0.663	0.003	***
E	←	R_n	0.655	0.003	***	E	←	L	0.131	0.028	0.002
E	←	u	-0.010	0.044	0.660	E	←	R_H	-0.548	0.001	***
E	←	L	0.130	0.029	0.002	E	←	T_a	0.527	0.004	***
E	←	R_H	-0.557	0.001	***	E	←	T	-0.695	0.023	***
E	←	T_a	0.531	0.004	***	T_a	←→	R_H	-0.230	2.794	***
E	←	T	-0.688	0.023	***	T_a	←→	R_n	0.617	1.081	***
T_a	←→	R_H	-0.294	4.475	***	T_a	←→	L	0.358	0.136	***
T_a	←→	S_W	-0.058	0.017	0.269	R_H	←→	S_W	0.647	0.079	***
T_a	←→	R_n	0.613	1.150	***	R_H	←→	L	0.145	0.519	0.002
T_a	←→	u	0.079	0.048	0.130	S_W	←→	R_n	0.238	0.011	***
T_a	←→	L	0.338	0.144	***	S_W	←→	u	0.276	0.001	***
R_H	←→	S_W	0.627	0.084	***	S_W	←→	L	-0.190	0.002	***
R_H	←→	R_n	-0.062	4.139	0.232	R_n	←→	L	0.227	0.128	***
R_H	←→	u	-0.146	0.204	0.006	L	←→	u	-0.300	0.006	***
R_H	←→	L	0.161	0.581	0.002						
S_W	←→	R_n	0.181	0.017	***						
S_W	←→	u	0.186	0.001	***						
S_W	←→	L	-0.198	0.002	***						
R_n	←→	u	-0.001	0.046	0.989						
R_n	←→	L	0.222	0.134	***						
u	←→	L	-0.301	0.007	***						

注：*** 表示 $P<0.001$，相关性显著；当 $P>0.001$ 时，显示为具体数值；←表示由自变量指向因变量；←→表示两因子之间的相关关系。

表 4 土壤蒸发量、植物蒸腾量与测量因子的结构方程模型拟合参数

Tab. 4 Fitting parameters of structural equation model for soil evaporation, plant transpiration and measurement factors

统计量	参数	判别标准	模型结果
绝对拟合指标	χ^2 自由度比值(NC)	NC 为(1, 3)，模型有简约适配程度	1.763
	绝对拟合指数(GFI)	GFI 大于 0.9，越接近 1 越好	0.992
	近似误差均方根(RMSEA)	RMSEA 小于 0.05，适配良好	0.046
相对拟合指标	规准适配指数(NFI)	NFI 大于 0.9，越接近 1 越好	0.994
	相对适配指数(RFI)	RFI 大于 0.9，越接近 1 越好	0.977
	增值适配指数(IFI)	IFI 大于 0.9，越接近 1 越好	0.998
	非规准适配指数(TLI)	TLI 大于 0.9，越接近 1 越好	0.990
	比较适配指数(CFI)	CFI 大于 0.9，越接近 1 越好	0.998
简约适配度指标	讯息效标系数(AIC)	AIC 越小越好	70.342
	预期交叉验证指数(ECVI)	ECVI 越小越好	0.191
	非中心参数(NCP)	NCP 越小越好	5.342

的影响由大到小顺序为：叶面积指数、气温、土壤表层含水率、净辐射、相对湿度，叶面积指数、气温是影响植株蒸腾量的重要因子(标准化总影响系数分别为 0.52、0.44)；相对湿度与植株蒸腾量呈负相关关系(标准化总影响系数为 -0.18)，其余均为正相关关系；参考高度的风速对植株蒸腾量无直接影响，而是通过叶面积指数、土壤表层含水率对植株蒸腾量间接影响。测量因子对土壤蒸发量的影响由大到小

顺序为：净辐射、土壤表层含水率、相对湿度、气温、叶面积指数，净辐射和土壤表层含水率是影响土壤蒸发量的重要因子（标准化总影响系数分别为 0.50、0.49）；相对湿度、叶面积指数与土壤蒸发量呈负相关关系（标准化总影响系数分别为 －0.43、－0.23），其余均为正相关关系；参考高度的风速对土壤蒸发量无直接影响，也是通过叶面积指数、土壤表层含水率对土壤蒸发量间接影响。

表 5　基于结构方程模型的土壤蒸发量、植物蒸腾量及影响因子标准化影响系数

Tab. 5　Standardized influence coefficient of soil evaporation, plant transpiration and influence factors based on structural equation model

影响因子		L	R_H	R_n	S_W	T_a	T
标准化总影响系数	T	0.52	－0.18	0.23	0.29	0.44	
	E	－0.23	－0.43	0.50	0.49	0.22	－0.70
标准化直接影响系数	T	0.52	－0.18	0.23	0.29	0.44	
	E	0.13	－0.55	0.66	0.69	0.53	－0.70
标准化间接影响系数	T						
	E	－0.36	0.12	－0.16	－0.20	－0.31	0

SEM 模型同时也显示了 6 个测量因子之间的相关关系。测量因子中，相关性最高的是相对湿度与土壤表层含水率（相关系数 0.65），其次是净辐射与气温（相关系数 0.62），再次是气温与叶面积指数（相关系数 0.36），均为正相关。负相关关系中，参考高度的风速与叶面积指数的相关系数为 －0.30，气温与相对湿度的相关系数为 －0.23，土壤表层含水率与叶面积指数的相关系数为 －0.19，以上测量因子间的相关关系均符合常理。

3　讨论

3.1　S－W 模型模拟精度

S－W 模型在 2 年生育期内对干旱区滴灌枣园的蒸散量及植株蒸腾量都能准确地估算，验证了 S－W 模型在干旱区滴灌枣园的适用性。S－W 模型的良好性能在其他生态系统中（草地[13]、森林[14]、葡萄园[32]等）也得到了验证。本文对枣园蒸散量、植株蒸腾量模拟精度与前人研究结果相似：本文 S－W 模型估算干旱区枣园蒸散量的 RMSE 为 0.62 ~ 0.76 mm/d，MAE 为 0.52 ~ 0.63 mm/d，d 为 0.92 ~ 0.94；ZHAO 等[32]使用 S－W 模型估算西北干旱区葡萄园蒸散量的 RMSE 为 0.68 mm/d，MAE 为 0.52 mm/d；ORTEGA 等[33]使用 S－W 模型估算葡萄园蒸散量的 RMSE 为 0.51 mm/d，MAE 为 0.41 mm/d，d 为 0.88。本文 S－W 模型估算枣园植株蒸腾量的 RMSE 为 0.46 ~ 0.51 mm/d，MAE 为 0.36 ~ 0.41 mm/d，R^2 为 0.95 ~ 0.97。ZHAO 等[32]使用 S－W 模型估算西北干旱区葡萄园植株蒸腾的 RMSE 为 0.76 mm/d，MAE 为 0.62 mm/d，R^2 为 0.70。

3.2　S－W 模型的不确定性

S－W 模型中假设土壤均质化，该假设较适合土壤全部湿润的灌溉方式，例如雨养灌溉[34]，但本文枣园采用滴灌，滴灌土壤湿润比为 75%，S－W 模型中未考虑特殊灌溉方式带来的部分土壤表面湿润对蒸散量估算的影响。模型中土壤均质化假设与实际情况有差别，可针对不同灌溉方式对土壤蒸发部分进行改进，以提高 S－W 模型的模拟精度。

3.3　基于 SEM 模型的蒸散特征分析

本文建立的结构方程模型与实测数据适配良好，不仅得到测量因子（气温、相对湿度、净辐射、土壤表层含水率、参考高度的风速、叶面积指数）对土壤蒸发量、植株蒸腾量的直接影响和间接影响，还反映了测量因子之间的相关关系。本文构建的 SEM 模型显示，叶面积指数对植株蒸腾量的影响最大，相关系数为 0.52，且是正相关，同时叶面积指数对土壤蒸发量的总影响是负相关，相关系数 －0.23，也验证了 HU 等[14]的结论：在 S－W 模型中，叶面积指数通过 3 种机制改变蒸散：促进冠层气孔阻力、促进土壤表面到冠层高度的空气动力学阻力、减少土壤表面的能量输入。土壤表层含水率对土壤蒸发量的直接影响最大（路径系数 0.69），且是正相关，这与吉喜斌等[35]在黑河流域春小麦模拟的结论一致，但与其研究方法不同。SEM 模型在前人定性分析研究的基础上给出了测量因子影响植株蒸腾量、土壤蒸发量具体的影响系数。

叶面积指数（标准化总影响系数 0.52）、气温（标准化总影响系数 0.44）对植株蒸腾量的总影响最大，净辐射（标准化总影响系数 0.50）、地表土壤含水率（标准化总影响系数 0.49）对土壤蒸发量的总影响最大，且都是正相关，即对蒸散量影响最重要的因子是叶面积指数、气温、净辐射、土壤表层含水率，这与前人研究结果一致[5,16,36]。

构建的结构方程模型对土壤蒸发量、植株蒸腾量的总解释率为84%、89%,说明该模型结构合理,且结构方程模型已包含影响土壤蒸发、植株蒸腾的大部分因子。传统统计方法往往忽略了测量因子之间的相关关系,而结构方程模型解决了传统研究方法的缺憾[29],得到了测量因子之间的相关关系。SEM 模型为土壤蒸发、植株蒸腾与测量因子之间的耦合关系提供了另一个视角,为农业水资源的高效利用提供了参考依据。

4 结论

(1)验证了 S-W 模型在干旱区滴灌枣园模拟蒸散量、植株蒸腾量的精度,蒸散量模拟精度为:RMSE 为 0.62 ~ 0.76 mm/d,b 为 0.77 ~ 0.88,R^2 为 0.95 ~ 0.97,d 为 0.92 ~ 0.94,EF 为 0.70 ~ 0.81,RSR 为 0.44 ~ 0.55;植株蒸腾量模拟精度为:RMSE 为 0.46 ~ 0.51 mm/d,b 为 1.08 ~ 1.04,R^2 为 0.95 ~ 0.97,d 为 0.90 ~ 0.94,EF 为 0.50 ~ 0.71,RSR 为 0.54 ~ 0.70。

(2)S-W 模型在干旱区滴灌枣园的适合模型参数为:a_1 为 6.944 5,g_0 为 0.043 9,b_2 为 4.604 1,b_3 为 957.110 6。

(3)结构方程模型得到 6 个测量因子对土壤蒸发量、植株蒸腾量的直接影响、间接影响和总影响,植株蒸腾量对土壤蒸发量的总影响系数为 -0.70;测量因子能够解释土壤蒸发量的 84%,净辐射对土壤蒸发影响最大,标准化总影响系数为 0.51;测量因子能够解释植株蒸腾量的 89%,叶面积指数对植株蒸腾影响最大,标准化总影响系数为 0.52。

参 考 文 献

[1] HUANG J, JI M, XIE Y, et al. Global semi-arid climate change over last 60 years [J]. Climate dynamics, 2016, 46(3-4): 1131-1150.

[2] DELGADO B M, MAESTRE F T, GALLARDO A, et al. Decoupling of soil nutrient cycles as a function of aridity in global drylands [J]. Nature, 2013, 502(7473): 672-676.

[3] 胡隐樵,张强. 开展干旱环境动力学研究的若干问题[J]. 地球科学进展,2001,16(1):18-23.
HU Yinqiao, ZHANG Qiang. Some issues of arid environment dynamics [J]. Advance in Earth Sciences, 2001, 16(1): 18-23. (in Chinese)

[4] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2020.

[5] ZHU G F, LI X, SU Y H, et al. Simultaneous parameterization of the two-source evapotranspiration model by Bayesian approach: application to spring maize in an arid region of Northwest China [J]. Geoscientific Model Development Discuss, 2014, 7(1): 741-775.

[6] 苏宝峰,张旭东,米志文,等. 基于光照度的农田蒸散量估算方法研究[J/OL]. 农业机械学报,2021,52(4):285-292,310.
SU Baofeng, ZHANG Xudong, MI Zhiwen, et al. Forecasting method of hay evapotranspiration based on illuminance[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 285-292, 310. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20210430&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.04.030. (in Chinese)

[7] GHARSALLAH O, FACCHI A, GANDOLFI C. Comparison of six evapotranspiration models for a surface irrigated maize agro-ecosystem in northern Italy [J]. Agricultural Water Management, 2013, 130: 119-130.

[8] 谢家兴,高鹏,孙道宗,等. 基于长短期记忆的柑橘园蒸散量预测模型[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(增刊2):351-356.
XIE Jiaxing, GAO Peng, SUN Daozong, et al. Modeling on prediction of evapotranspiration of citrus orchard based on LSTM [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.2): 351-356. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2020s241&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.041. (in Chinese)

[9] SHUGART H H. Methods in ecosystem science [M]. New York: Springer Press, 2000: 373-388.

[10] 程玉菲,王根绪,席海洋,等. 近 35a 来黑河干流中游平原区陆面蒸散发的变化研究[J]. 冰川冻土,2007,29(3):406-412.
CHENG Yufei, WANG Genxu, XI Haiyang, et al. Variations of land evapotranspiration in the plain of the middle reaches of Heihe River in the recent 35 years [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(3): 406-412. (in Chinese)

[11] SHUTTLEWORTH W J, WALLACE J S. Evaporation from sparse crops an energy combination theory [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1985, 111(469): 839-855.

[12] 汉光昭,曹广超,曹生奎,等. 基于 Shuttleworth-Wallace 模型的小泊湖和沙柳河河源区湿地蒸散发模拟研究[J]. 湿地科学,2019,17(5):519-526.
HAN Guangzhao, CAO Guangchao, CAO Shengkui, et al. Simulation of evapotranspiration of Xiaopo Lake and Shaliu River headwater wetlands based on Shuttleworth-Wallace model [J]. Wetland Science, 2019, 17(5): 519-526. (in Chinese)

[13] HU Z, YU G, ZHOU Y, et al. Partitioning of evapotranspiration and its controls in four grassland ecosystems: application of a two-source model [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(9): 1410-1420.

[14] HU Zhongmin, LI Shenggong, YU Guirui, et al. Modeling evapotranspiration by combing a two-source model, a leaf stomatal model, and a light-use efficiency model [J]. Journal of Hydrology, 2013, 501(11): 186-192.

[15] 董军,岳宁,党慧慧,等. 应用修订的 Shuttleworth-Wallace 模型对半干旱区覆膜玉米蒸散的研究[J]. 中国生态农业学报,2016,24(5):674-683.
DONG Jun, YUE Ning, DANG Huihui, et al. Estimation of evapotranspiration in maize fields with ground mulching with plastic film in semi-arid areas using revised Shuttleworth-Wallace model [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(5): 674-683. (in Chinese)

[16] 郭春明,任景全,张铁林,等. 东北地区春玉米生长季农田蒸散量动态变化及其影响因子[J]. 中国农业气象,2016,

37(4):400－407.
GUO Chunming, REN Jingquan, ZHANG Tielin, et al. Dynamic change of evapotranspiration and influenced factors in the spring maize field in Northeast China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2016, 37(4): 400－407. (in Chinese)
[17] GRACE J B. Structural equation modeling and natural systems [M]. Cambridge University Press, 2006: 3－21.
[18] 张雪松,闫艺兰,胡正华.不同时间尺度农田蒸散影响因子的通径分析[J].中国农业气象,2017,38(4):201－210.
ZHANG Xuesong, YAN Yilan, HU Zhenghua. Using path analysis to identify impacting factors of evapotranspiration at different time scales in farmland [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2017, 38(4): 201－210. (in Chinese)
[19] 王酉石,储诚进.结构方程模型及其在生态学中的应用[J].植物生态学报,2011,35(3):337－344.
WANG Youshi, CHU Chengjin. A brief introduction of structural equation model and its application in ecology [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(3): 337－344. (in Chinese)
[20] 王树力,周健平.基于结构方程模型的林分生长与影响因子耦合关系分析[J].北京林业大学学报,2014,36(5):7－12.
WANG Shuli, ZHOU Jianping. Coupling relationship between stand growth and impacting factors based on structural equation model [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(5): 7－12. (in Chinese)
[21] 缪子梅,俞双恩,卢斌,等.基于结构方程模型的控水稻“需水量-光合量-产量”关系研究[J].农业工程学报,2013,29(6):91－98.
MIAO Zimei, YU Shuang'en, LU Bin, et al. Relationships of 'water requirement－photosynthesis－production' for paddy rice using structural equation modeling [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(6): 91－98. (in Chinese)
[22] 于贵瑞,张雷明,孙晓敏.中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)的主要进展及发展展望[J].地理科学进展,2014,33(7):903－917.
YU Guirui, ZHANG Leiming, SUN Xiaomin. Progresses and prospects of Chinese terrestrial ecosystem flux observation and research network (ChinaFLUX) [J]. Progress in Geography, 2014, 33(7): 903－917. (in Chinese)
[23] 龙秋波,贾绍凤.茎流计发展及应用综述[J].水资源与水工程学报,2012,23(4):18－23.
LONG Qiubo, JIA Shaofeng. Review on the development and application of sap flow gauge [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2012, 23(4): 18－23. (in Chinese)
[24] BALL J T, WOODROW L 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. Springer, Dordrecht,1987: 221－224.
[25] 林家鼎,孙菽芬.土壤内水分流动、温度分布及其表面蒸发效应的研究——土壤表面蒸发阻抗的探讨[J].水利学报,1983(7):1－8.
LIN Jiading, SUN Shufen. Moisture and heat flow in soil and theirs effects on bare soil evaporation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983(7): 1－8. (in Chinese)
[26] ROSA R D, PAREDES P, RODRIGUES G C, et al. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software: 1. Background and computational strategy [J]. Agricultural Water Management, 2012, 103: 8－24.
[27] 闫世程,张富仓,吴悠,等.滴灌夏玉米土壤水分与蒸散量 SIMDualKc 模型估算[J].农业工程学报,2017,33(16):152－160.
YAN Shicheng, ZHANG Fucang, WU You, et al. Estimation of drip irrigated summer maize soil water content and evapotranspiration based on SIMDualKc model [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(16): 152－160. (in Chinese)
[28] 吴明隆.结构方程模型- AMOS 的操作与应用[M].2 版.重庆:重庆大学出版社,2017:412－417.
[29] 曾勰婷,彭正萍,彭云峰.基于结构方程模型的玉米施氮量-光合产物-产量关系研究[J].农业工程学报,2016,32(10):98－104.
ZENG Xieting, PENG Zhengping, PENG Yunfeng. Structural equation model analyzing relationship among N application-carbonhydrate product-grain yield of maize [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(10): 98－104. (in Chinese)
[30] 高磊,申双和,邵立瑛,等.水稻蒸散特征及日尺度作物系数估算[J].中国农业气象,2016,37(2):158－165.
GAO Lei, SHEN Shuanghe, SHAO Liying, et al. Evapotranspiration characteristics and crop coefficient estimation of paddy rice[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2016, 37(2): 158－165. (in Chinese)
[31] 魏光辉.新疆阿克苏市近 50 余年主要水文要素变化分析[J].水资源开发与管理,2015(3):81－84.
WEI Guanghui. Analysis on changes of main hydrological features during the last 50 years in Xinjiang Aksu [J]. Water Resources Development and Management, 2015(3): 81－84. (in Chinese)
[32] ZHAO Peng, LI Sien, LI Fusheng, et al. Comparison of dual crop coefficient method and Shuttleworth－Wallace model in evapotranspiration partitioning in a vineyard of Northwest China [J]. Agricultural Water Management, 2015, 160: 41－56.
[33] ORTEGA F S, POBLETE E C, BRISSON N. Parameterization of a two-layer model for estimating vineyard evapotranspiration using meteorological measurements [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(2): 276－286.
[34] 卫新东,刘守阳,陈滇豫,等.Shuttleworth－Wallace 模型模拟陕北枣林蒸散适用性分析[J/OL].农业机械学报,2015,46(3):142－151.
WEI Xindong, LIU Shouyang, CHEN Dianyu, et al. Applicability of Shuttleworth－Wallace model for evapotranspiration estimation of jujube forests in loess hilly-gully region [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 142－151. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20150320&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.020. (in Chinese)
[35] 吉喜斌,康尔泗,赵文智,等.黑河流域山前绿洲灌溉农田蒸散发模拟研究[J].冰川冻土,2004,26(6):713－719.
JI Xibin, KANG Ersi, ZHAO Wenzhi, et al. Simulation of the evapotranspiration from irrigational farmlands in the oases of the Heihe River Basin [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(6): 713－719. (in Chinese)
[36] ZHAO W, LIU B, CHANG X, et al. Evapotranspiration partitioning, stomatal conductance, and components of the water balance: a special case of a desert ecosystem in China [J]. Journal of Hydrology, 2016, 538: 374－386.