

Shuttleworth – Wallace模型模拟陕北枣林蒸散适用性分析*

卫新东^{1,2} 刘守阳³ 陈滇豫¹ 汪有科^{1,4} 汪 星¹ 魏新光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. 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054;
3. 法国国家农业科学研究院 (INRA) 地中海气候与农业水利系统模拟实验室, 阿维尼翁 84914;
4. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 在生态脆弱的陕北黄土丘陵区, 林地耗水是生态学者长期关注的热点问题, 准确测算植物耗水量是环境水分研究的关键。根据陕北山地枣林的立地条件和蒸散过程特点, 结合 2012 年的实测资料, 确定了相关模型参数, 实现了 Shuttleworth – Wallace (SW) 和 Penman – Monteith (PM) 模型对枣林蒸散量的模拟, 并利用 2013 年茎流计监测的蒸腾量和水量平衡原理推求的蒸散量, 对这 2 个模型进行了比较和检验。结果表明: 就整个枣树生育期 10 d 尺度蒸散量而言, SW 模型模拟精度优于 PM 模型。此外, 2 模型精度随枣树生育期变化而变化, 且萌芽展叶期精度均最低。SW 模型日蒸腾量模拟精度满足要求, 但易受到天气状况影响, 晴天模型精度优于雨天。SW 模型精度在陕北山地枣林里得到验证, 是半干旱区山地枣林耗水规律研究的有效工具。

关键词: 梨枣 Shuttleworth – Wallace 模型 Penman – Monteith 模型 蒸散量

中图分类号: S715.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)03-0142-10

Applicability of Shuttleworth – Wallace Model for Evapotranspiration
Estimation of Jujube Forests in Loess Hilly-gully Region

Wei Xindong^{1,2} Liu Shouyang³ Chen Dianyu¹ Wang Youke^{1,4} Wang Xing¹ Wei Xinguang¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. The School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China
3. Unite of Modelling Agricultural and Hydrological Systems in Mediterranean Environment, French National Institute of Agronomic Research (INRA), Avignon 84914, France
4. Soil and Water Conservation and Ecological Environment Research Center, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In the Loess Plateau region, where climatic conditions are dry with severe water shortage, agricultural development is limited by water availability. Several studies have shown that due to high water consumption and poor land management, forest trees induce soil dry-up and ecological degradation in Loess Plateau region. Pear jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) is one of the common tree species cultivated in this region due to its high drought tolerance and considerable economic benefits, but there are limited studies about its water consumptions. Sustainable cultivation of vast jujube plantations could prevent these ecological issues in the fragile ecological environment of Loess Plateau. Evapotranspiration (ET), which is the sum of plant transpiration and soil evaporation, is a continuous process of water loss in the soil-plant-atmosphere continuum. An accurate prediction of ET is necessary for developing agricultural management strategies to improve water use efficiency and ensure sustainable agricultural production.

收稿日期: 2014-11-03 修回日期: 2014-12-21

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2013BAD20B03、2011BAD29B04)、陕西省科技统筹创新工程资助项目(2013KTZB02-03-02)和林业公益性行业科研专项资助项目(201404709)

作者简介: 卫新东, 博士生, 长安大学讲师, 主要从事水土资源综合高效利用研究, E-mail: weixindong@126.com

通讯作者: 汪有科, 研究员, 博士生导师, 主要从事水资源高效利用研究, E-mail: gjzwyk@vip.sina.com

Therefore, the aim of this study on the simulation model of jujube ET would be significant. In addition, the single-layer Penman – Monteith (PM) model is the most commonly used and the one recommended by FAO. However, the model is mostly used for dense canopy vegetation types as the “big-leaf” assumption cannot sufficiently differentiate between vegetation and bare soil. As a measure of PM model weakness, Shuttleworth and Wallace developed a more complex two-layer interactive model called the Shuttleworth – Wallace (SW) model that allows interaction between canopy and bare-soil flue. The two-layer SW model shows a superior performance over single-layer models. In the Loess Plateau, due to water shortage, jujube forests are usually cultivated sparsely with low canopy cover, so it is necessary to select a suitable ET model for pear jujube forest. Based on the forest stand and climate condition, we parameterized the SW and PM models by using the data measured in 2012 and fulfilled the estimation of pear jujube forest ET in the fragile, semi-arid, hilly Loess Plateau region of Mengcha Village in Shaanxi Province, China. Then the estimated ET by SW and PM models were validated and compared through ET computed by water balance theory, while the estimated transpiration by SW model was examined by observation from thermal dissipation probes (TDP) during 2013. The results showed that over the whole growing season, SW model performed better than PM model in ET estimation. Their accuracy was the poorest in the germination and leaf expansion stage and changed following the growth seasons. The accuracy of SW model in ET estimation met the evaluation criteria but PM model did not. The accuracy of SW model in transpiration estimation met the evaluation criteria, but it was affected by the weather condition, specifically, sunny days were better than rainy days. In the stand of sparsely cultivated jujube forest, the reliability of SW was comprehensively validated. Therefore, SW model could be the promising model applied in ET estimation to grasp the law of water consumption for jujube forest and similar stand in the semi-arid Loess Plateau.

Key words: Pear jujube Shuttleworth – Wallace model Penman – Monteith model Evapotranspiration

引言

在农业生态系统中,超过 90% 的水量通过蒸散损失掉^[1]。蒸散量 ET 包括两部分——植物蒸腾量 T 和土壤蒸发量 E ,准确地测量和估算 ET 以及它的 2 个组成部分(E 和 T)的值对农业领域很多方面都十分关键,比如灌溉制度确立,工程节水、设施节水和农艺节水措施的应用以及产量预测等^[2-3]。另外,黄土高原地区水土流失与干旱缺水并存,为了改善恶化的生态环境,该区大规模地实施了退耕还林工程。然而已有研究发现,由于林木对土壤水分的过度消耗,规模化的人工林在该区域引起了大范围的土壤干化问题,局部地区甚至形成了永久性的土壤干层^[4-6]。准确估算该区人工林地的蒸散耗水量,能为预测土壤生态恶化问题和制定相关缓解措施提供依据。

枣树作为黄土高原退耕还林的一种重要经济林木,经济和生态效益显著,在陕北种植面积已经达到 100 多万 hm^2 ^[7]。山地枣林蒸散耗水规律的研究还很缺乏^[8],但这却是制定合理的栽培和管理措施的基础,对于提高水分利用效率和维持枣林可持续发展有重要意义。

Penman – Monteith (PM) 模型是 FAO 推荐的蒸散量计算方法^[9],但作为单源大叶模型,未单独考虑土面蒸发过程,当冠层郁闭度较低时,PM 模型的冠层郁闭假设不成立,模型误差较大^[10]。Shuttleworth 等^[11]在 PM 模型基础上建立了蒸发和蒸腾二源耦合 Shuttleworth – Wallace (SW) 模型。相较于 PM 模型,SW 模型可以单独模拟蒸发和蒸腾过程。前人比较了 PM 和 SW 模型在草地、天然林等植被条件下的精度,认为 SW 较 PM 模型模拟蒸散量具有更高的精度^[12]。SW 模型已被用于葡萄、玉米、小麦、棉花、杨树等的蒸散量模拟^[13-14],模拟结果精度较高。但尚未见 SW 模型在黄土高原山地经济林木中应用的相关报道。在矮化密植条件下(株行距 $2\text{ m} \times 3\text{ m}$),陕北山地枣林郁闭度仅为 40%,就立地条件而言,SW 模型适用于当地枣林蒸散量模拟,但其与 PM 模型的精度有待进一步比较。

由于单独考虑蒸发和蒸腾 2 个过程,SW 模型需要较多的阻力和空气动力学参数,复杂的参数求解过程影响了 SW 模型的广泛使用。本文系统总结各个参数的求解方法,并基于 2012 年的实测资料确定相关模型参数,讨论敏感参数对模型精度的影响。此外,利用山地枣林 2013 年全生育期的实测数据,

检验 SW 模型在枣树不同生育期和气象条件下的蒸腾量、蒸散量的模拟精度,比较 SW 和 PM 模型日蒸散量模拟精度,寻找适宜的半干旱地区山地经济林耗水模型。

1 材料与方法

1.1 模型介绍

PM 模型是经典的蒸发蒸腾量估算模型^[9](图 1^[15]),即

$$ET_{PM} = \frac{\Delta(R_n - G) + \frac{\rho c_p D}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \tag{1}$$

- 式中 ET_{PM} ——PM 模型模拟蒸散量, MJ/($m^2 \cdot d$),
乘以系数 0.408 可转换为 mm/d
 R_n ——总净辐射量, MJ/($m^2 \cdot d$)
 G ——土壤热通量, MJ/($m^2 \cdot d$), 日尺度上
 $G \approx 0$
 Δ ——饱和水汽压与温度曲线斜率, kPa/°C
 D ——空气饱和水汽压差, kPa
 ρ ——空气密度, kg/m^3
 γ ——温度计常数, kPa/°C
 c_p ——定压比热容, 取 1.013×10^{-3} MJ/($kg \cdot ^\circ C$)
 r_c ——冠层阻力, m/s
 r_a ——空气动力学阻力, m/s

SW 模型是由 PM 模型改进而来的双源耦合模型,尤其适用于稀疏冠层情况下的蒸发和蒸腾过程模拟^[11](图 1),即

$$ET_{SW} = C_c ET_c + C_s ET_s \tag{2}$$

$$C_c = \frac{1}{1 + \frac{R_c R_a}{R_s (R_c + R_a)}} \tag{3}$$

$$C_s = \frac{1}{1 + \frac{R_s R_a}{R_c (R_s + R_a)}} \tag{4}$$

$$R_a = (\Delta + \gamma) r_a^a \tag{5}$$

$$R_s = (\Delta + \gamma) r_a^s + \gamma r_s^s \tag{6}$$

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

$$ET_c = \frac{\Delta R_n + \frac{\rho c_p D - \Delta r_a^c R_{ns}}{r_a^a + r_a^c}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s^c}{r_a^a + r_a^c}\right)} \tag{8}$$

$$ET_s = \frac{\Delta R_n + \frac{\rho c_p D - \Delta r_a^s (R_n - R_{ns})}{r_a^a + r_a^s}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s^s}{r_a^a + r_a^s}\right)} \tag{9}$$

$$D_0 = D + \frac{[\Delta R_n - (\Delta + \gamma) ET_{SW}] r_a^a}{\rho c_p} \tag{10}$$

$$E_{SW} = \frac{\Delta R_{ns} + \frac{\rho c_p D_0}{r_a^s}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s^s}{r_a^s}\right)} \tag{11}$$

$$T_{SW} = \frac{\Delta(R_n - R_{ns}) + \frac{\rho c_p D_0}{r_a^c}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s^c}{r_a^c}\right)} \tag{12}$$

$$R_{ns} = R_n \exp(-CL) \tag{13}$$

- 式中 ET_{SW} ——SW 模型模拟蒸散量, MJ/($m^2 \cdot d$),
乘以系数 0.408 可转换为 mm/d
 E_{SW} ——SW 模型模拟蒸发量, MJ/($m^2 \cdot d$)
 T_{SW} ——SW 模型模拟蒸腾量, MJ/($m^2 \cdot d$)
 ET_c ——冠层闭合条件下的蒸发蒸腾量, MJ/($m^2 \cdot d$)
 ET_s ——裸地条件下蒸发蒸腾量, MJ/($m^2 \cdot d$)
 C_c —— ET_c 相应的比例系数
 C_s —— ET_s 相应的比例系数
 R_s 、 R_c 、 R_a ——中间变量
 r_c^c ——冠层阻力, m/s
 r_a^c ——冠层边界层阻力, m/s
 r_a^s ——土壤边界层阻力, m/s

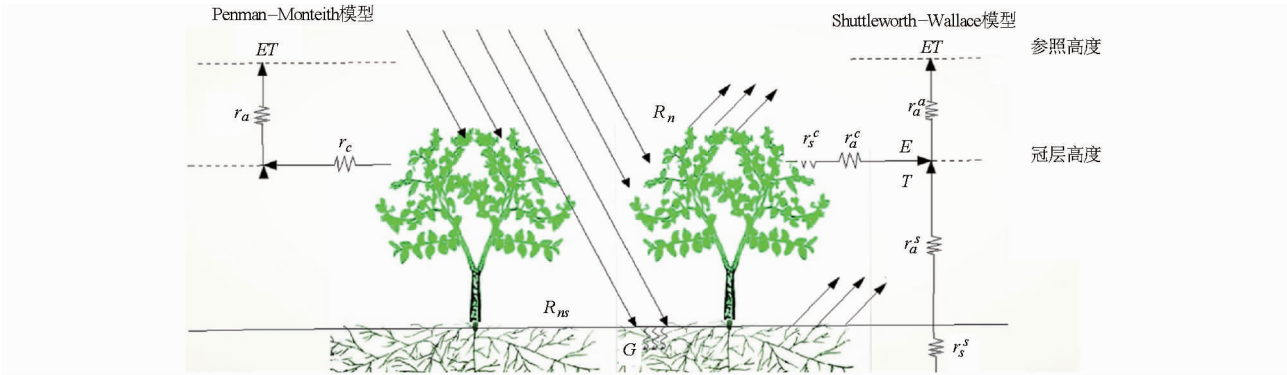


图 1 SW 和 PM 模型原理图

Fig. 1 Graphical representation of SW and PM model

r_a^a ——空气动力学阻力, m/s
 r_s^s ——地表阻力, m/s
 R_{ns} ——土壤表面净辐射量, MJ/(m²·d)
 L ——叶面积指数
 C ——消光系数

Shuttleworth 和 Wallace^[16]认为 SW 模型对 C 值在 0.5 ~ 0.9 之间不敏感。此外, Shuttleworth 等^[17]认为可以忽略冠层结构变化(主要为 L 增长)对 C 的影响, 建议取定值 0.5。本文取 $C = 0.5$ 。

1.2 模型参数

PM 模型中阻力参数只有 r_c 、 r_a , 求解方法简单, FAO56^[9]中有详细介绍。SW 模型考虑了地表和冠层 2 个表面的水汽运移过程, 参数较多、求解复杂。在总结前人研究的基础上, 结合陕北山地枣林立地条件, 给出了各参数的求解方法。

1.2.1 冠层表面阻力 r_a^c 、 r_s^c

Shuttleworth 等^[17]定义冠层边界层阻力(r_a^c)和冠层阻力(r_s^c)为

$$r_a^c = \frac{r_b}{2L} \tag{14}$$

$$r_s^c = \frac{r_l}{2L} \tag{15}$$

式中 r_b ——叶片边界层阻力, m/s
 r_l ——叶片气孔阻力, m/s

Shuttleworth 等^[11]给出了综合考虑树体高度、风速等指标的 r_b 计算方法, 即

$$r_b = \frac{100}{n} \left(\frac{w}{u_h} \right)^{\frac{1}{2}} \left[1 - \exp \left(- \frac{n}{2} \right) \right]^{-1} \tag{16}$$

$$n = \begin{cases} 2.5 & (h_c \leq 1) \\ 2.306 + 0.194h_c & (1 < h_c < 10) \\ 4.25 & (h_c \geq 10) \end{cases} \tag{17}$$

式中 u_h ——冠上风速, 冠高 2 m, 由布设的气象站测得, m/s
 w ——典型叶片宽度, 落叶植物为最大叶片宽度^[8], 枣树取 6 cm
 n ——涡流扩散衰减常数
 h_c ——树体高度, 取 2 m

采用 Li 等^[18]提出的气孔阻力模型为

$$r_l = r_{\max} \exp \left(- aD \right) R_{PAR} / (b + R_{PAR}) \tag{18}$$

式中 $r_{\max}$ ——理论最大气孔导度, s/m
 a 、 b ——经验系数
 R_{PAR} ——光合有效辐射量, W/m²

基于实测的 r_l 、 D 和 R_{PAR} 数据(详见监测指标), 以 2012 年的数据率定模型参数, 利用最小二乘法拟合出 $r_{\max}$ 、 a 和 b 的值, 分别为 8.12 s/m、0.51、

312.15。
1.2.2 土壤边界层阻力 r_a^s 和空气动力学阻力 r_a^a
基于梯度扩散理论(K-theory), Shuttleworth 等^[11]求取了裸地和冠层郁闭两种极端条件下的空气动力学阻力, 并假设稀疏冠层条件下的 r_a^s 、 r_a^a 由以 L 为参数进行线性插值得到, 朱仲元等^[19]在建立 SW 模型中使用了此求解方法, 但缺少相应的理论基础, Shuttleworth 等^[17]进一步研究提出了如下模型, 并证实其精度优于原方法。

$$r_a^s = \frac{h_c \exp(n)}{nk_h} \left[\exp \left(- \frac{nz_{0g}}{h_c} \right) - \exp \left(- \frac{n(Z_0 + d_p)}{h_c} \right) \right] \tag{19}$$

$$r_a^a = \frac{1}{ku_*} \ln \left(\frac{Z_a - d_0}{h_c - d_0} \right) + \frac{h_c}{nk_h} \left[\exp \left(n \left(1 - \frac{Z_0 + d_p}{h_c} \right) \right) - 1 \right] \tag{20}$$

$$k_h = ku_* (h_c - d_0) \tag{21}$$

$$u_* = ku_a / \ln \frac{Z_a - d_0}{z_0} \tag{22}$$

$$d_0 = \begin{cases} h_c - z_{0c} / 0.3 & (L \geq 4) \\ 1.1H_c \ln(1 + (c_d L)^{1/4}) & (L < 4) \end{cases} \tag{23}$$

$$z_0 = \min \{ 0.3(h_c - d_0), z_{0g} + 0.3h_c (c_d L)^{0.5} \} \tag{24}$$

$$z_{0c} = \begin{cases} 0.13h_c & (h_c \leq 1) \\ 0.139h_c - 0.009h_c^2 & (1 < h_c < 10) \\ 0.05h_c & (h_c \geq 10) \end{cases} \tag{25}$$

$$c_d = \begin{cases} 1.4 \times 10^{-3} & (h_c = 0) \\ (-1 + \exp(0.909 - 3.03z_{0c}/h_c))^4 / 4 & (h_c > 0) \end{cases} \tag{26}$$

式中 k_h ——冠上涡流扩散系数, m²/s
 z_{0g} ——地面粗糙度, 林地取 0.02 m
 Z_0 ——理论粗糙度, 取 0.13 h_c , m
 d_p ——零平面位移, 取 0.63 h_c , m
 k ——Karman's 系数, 取 0.41
 Z_a ——参照高度, 取 4 m
 u_* ——摩擦速度, m/s
 u_a ——参照高度处风速, 近似认为等于冠上风速 u_h , m/s
 z_0 ——冠层粗糙度, m
 z_{0c} ——密闭冠层的粗糙度, m
 c_d ——单位叶片的阻力系数

关于空气动力学参数的详细讨论参照文献[15]。

1.2.3 地表阻力 r_s^s

Monteith^[9]定义地表阻力为湿土层蒸发的水蒸

气扩散到地表干土层遇到的阻力。借鉴欧姆定律 (Ohm's law), Shuttleworth 等^[11]给出 r_s^s 的公式定义

$$r_s^s = \frac{(e_w(T_s) - e_0)\rho c_p}{E\gamma} \tag{27}$$

式中 $e_w(T_s)$ ——地表饱和水汽压, kPa
 e_0 ——冠层饱和水汽压, kPa
 T_s ——地表温度, °C

由于 E 为未知量, 因而此方程不能用于 r_s^s 的求解。许多学者尝试建立了 r_s^s 的模型, 但由于研究区域缺少表层土壤特性资料和地面蒸发监测数据, 无法借鉴相关研究成果。Shuttleworth 等^[11]指出 0、500 和 2 000 m/s 分别代表土壤湿润、适宜和干旱情况下的土壤阻力。陕北为半干旱气候, 枣树生育期内土壤水分较低, 以 2012 年的实测数据为基准, 人工调试 r_s^s , 发现取 1 200 m/s 时模型精度较高, 据此在枣树生育期内取 r_s^s 为此定值 (详见第 3 节)。此研究中 SW 模型相关参数取值见表 1。

表 1 适用于黄土高原地区枣林蒸散量估算的 SW 模型参数

Tab. 1 SW model parameters for evapotranspiration estimation of jujube forests in Loess Hilly-gully region

参数	取值
消光系数 C	0.5
经验系数 a	0.51
经验系数 b	312.15
树体高度 h_c /m	2
Karman's 系数 k	0.41
典型叶宽 w /cm	6
地表粗糙度 z_{0g} /m	0.02
理论粗糙度 Z_0 /m	0.26
零平面位移 d_p /m	1.26
地表阻力 r_s^s /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1 200
理论最大气孔导度 $r_{\max}$ /($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$)	8.12

1.3 模型精度检验

采用绝对平均误差 (e)、威尔莫特一致性指数 (D')、决定系数 (R^2) 等统计方法进行模型检验。模型精度可靠的标准为 $R^2 > 0.8$, $D' > 0.8$, $E < 20\%$ ^[20]。

$$E = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{O} \times 100\% \tag{28}$$

$$D' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O_i| + |O_i - O|)^2} \tag{29}$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \tag{30}$$

式中 P_i ——模拟值
 O_i ——实测值
 O ——实测值平均值

1.4 数据来源

1.4.1 研究区概况

数据监测于 2012 年和 2013 年在西北农林科技大学榆林市米脂试验站进行。当地为典型黄土高原丘陵沟壑区。属温带半干旱气候区, 年日照时数 2 761 h, 日照百分率 62%, 平均气温 8.4 °C, 年总辐射量 580.5 kJ/cm², 平均年降水量 451.6 mm, 其中 7、8 月份降水量占全年降水量的 49%。土壤为黄土母质上发育的黄绵土。

监测对象为 10 a 生矮化梨枣树, 于面积 2.5 hm² 的东坡枣林地 (坡度约为 40°) 里选取树体长势和冠层大体一致的枣树 6 株, 树体平均高度 (2±0.12) m, 株行距为 2 m×3 m。枣树整个生育阶段包括 4 个生育期, 依次为: 萌芽展叶期、开花坐果期、果实膨大期和果实成熟期。

1.4.2 监测指标

气象指标: 在试验点附近布设小型气象站 (RR-9100 型, 中国), 步长为 10 min, 测量要素包括: 降水量 P (mm)、净辐射量 R (W/m²)、风速 u (m/s)、温度 t (°C) 和相对湿度 R_H (%)。

树干液流: 在选取的 6 株梨枣树干上各安装一组热扩散式探针 TDP (Dynamax Co., 美国), 利用 CR1000 型数据采集器采集数据, 步长为 10 min。采用 Granier 经验公式^[21] 计算树干液流速率, 参照 Williams 等^[22] 方法, 将液流速率转换为耗水量 (mm)。

气孔特性: 为了建立气孔模型, 利用 LI-6400 型光合仪测量枣树的气孔特性, 在枣树生育期内选取了 10 个晴天, 从 8:00—18:00, 每 1 h 测量叶片的 D 、气孔阻力 r_l 和 R_{PAR} 。

叶面积指数 L : 采用基于冠层孔隙度分析的 Winscanopy 叶面积指数仪 (Winscanopy 2005a 型, Regent instruments Inc., 加拿大) 测定 L , 步长为 10 d。步骤为: 先用鱼眼相机在冠下拍照, 然后利用软件对冠层照片进行分析即可得到 L 以及其他冠层特性指标。为了获取 L 的日动态, 利用 Logistic 生长函数对 L 变化进行了拟合, 效果良好 (图 2)。2012 年和 2013 年拟合式分别为

$$L_{2012} = \frac{2.87}{1 + \exp(-0.039(D_{OY} - 152.51))} \quad (R^2 = 0.95) \tag{31}$$

$$L_{2013} = \frac{3.57}{1 + \exp(-0.048(D_{OY} - 154.38))} \quad (R^2 = 0.94) \tag{32}$$

式中 D_{OY} ——年积日

土壤含水率 (用于水量平衡方程计算枣树耗水

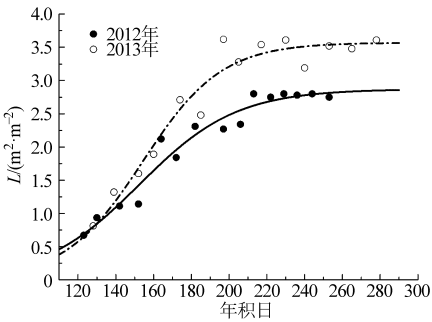


图 2 2012 年和 2013 年生育期内枣树叶面积指数 L 变化情况

Fig. 2 Daily variations of leaf area index L during jujube growth seasons in 2012 and 2013

率):在枣树株间和行间分别布设中子管(铝管)(图 3.4^[15]),深度为 3 m。利用中子仪每隔 10 d 测定一次含水率(体积含水率),步长为 20 cm。由于枣树种植在水平阶上,生育期内未观测到地表径流。此外,叶面积指数较低,故忽略冠层截留。当地枣林的种植方式多为雨养,生育期内不灌溉。结合气象站监测的降雨资料,以水量平衡法计算蒸散量,为

$$ET'_i = P'_i + V_i^o - V_i \tag{33}$$

式中 ET'_i ——水量平衡法计算第 i 时段内的蒸散量,mm
 P'_i ——第 i 时段内降水量,mm
 V_i^o ——第 i 时段始 3 m 土层内储水量,mm
 V_i ——第 i 时段末 3 m 土层内储水量,mm
土壤含水率(用于实时展现枣林地表层和根区

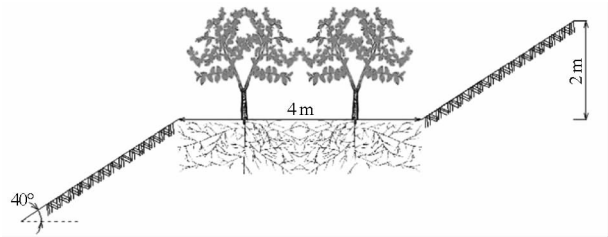


图 3 枣树种植位置示意图

Fig. 3 Diagrammatic drawing of jujube planting

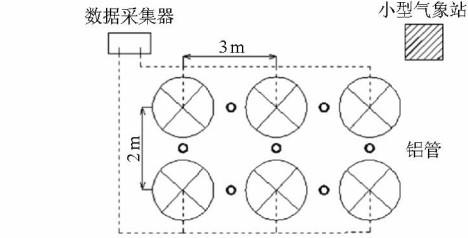
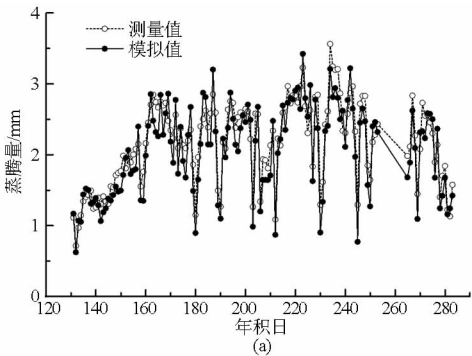


图 4 监测设备布设图

Fig. 4 Measurement equipment layout

水分状况,为模型参数选取提供依据):根据前人研究,研究区雨养条件下枣树根系主要分布在 1 m 以内的土层里^[21],为实时观测根区土壤含水率,在枣林地 1 m 内的土层里埋设一组时域反射水分探头 TDT(SDI-12 型,Acclima, Inc, 美国),探头间隔为 20 cm,利用 CR1000 型数据采集器采集数据,步长为 10 min。定期用烘干法对数据进行校正。

2 结果与分析

2.1 基于 SW 模型的山地枣林日蒸腾量模拟

SW 模型是双源耦合模型,可以单独模拟蒸腾过程,茎流计动态监测的枣树蒸腾量可为其精度检验提供依据。在日尺度内,以 R_H 、 W 、 R 的平均值以及 T 的日最大值和最小值作为 SW 模型的输入变量,进行了日蒸腾量的模拟。整体而言,模拟值能够很好地表现蒸腾的变化规律(图 5)。此外,进一步分析了 SW 模型在晴天和雨天两种情况下的蒸腾模拟精度(图 6)。

晴天 $Y = 0.9X + 0.26 \tag{34}$

雨天 $Y = 1.04X - 0.19 \tag{35}$

式中 Y ——模拟蒸腾量,mm
 X ——实测蒸腾量,mm

结果表明,SW 模型蒸腾模拟精度受到天气状况的影响,晴天精度高于雨天,但各天气条件下均满足模型可靠性判定标准要求(2012 年: $E = 9.66\%$, $D' = 0.88$, $R^2 = 0.86$; 2013 年: $E = 19.46\%$, $D' =$

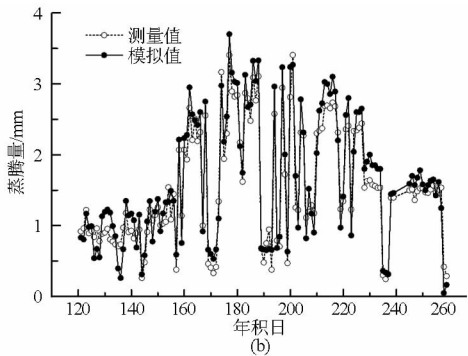


图 5 山地枣林 2012 年和 2013 年全生育期日蒸腾量测量值和 SW 模型模拟值

Fig. 5 Observed jujube forest daily transpiration and estimation by SW model over 2012 and 2013 growth seasons

(a) 2012 年 (b) 2013 年

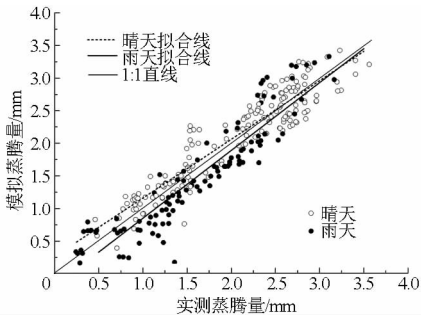


图 6 SW 模型山地枣林全生育期日蒸腾量模拟值检验
Fig. 6 Validation of estimated daily transpiration by SW model for jujube forests over growth season

0.81, $R^2 = 0.85$)。

气孔阻力是影响植株蒸腾的重要因素,同时是 SW 模型最为敏感的阻力参数^[16]。气孔阻力受光照、 D 、植物水分状况、叶片温度、 CO_2 浓度等的共同影响^[16,20]。陕北半干旱地区雨养条件下,1 m 土层内含水量较低且除个别短时段外波动并不剧烈(6.5%~8.5%,图 7),可以认为枣树在整个生育阶段处于基本恒定的亏水状态,因而忽略土壤水分状况对气孔导度的影响。为了进一步简化观测量和样本数,本文选取了考虑 D 、 R_{PAR} 2 个重要因素的气孔阻力模型^[18]。检验结果表明,利用此气孔模型,SW 模型能够较精确地模拟日蒸腾过程(图 5)。在土壤水分基本恒定的前提下,该气孔模型是适宜的,但在降雨天气或者大雨过后,土壤含水量得到短期补充,水分胁迫状况在一定程度上得以缓解,而气孔模型计算仍为水分胁迫下的气孔阻力,气孔阻力模拟值高于实际值,而气孔阻力与蒸腾为负相关关系,进而造成蒸腾量模拟值在降雨条件下低于测量值(图 6),故 SW 模型蒸腾模拟精度雨天差于晴天。

2013 年枣树生育期里降雨天数(48 d)多于 2012 年(60 d),并且 2013 年果实膨大期内大约有一个月的时间内(DOY190—DOY220)由于受连续降雨的影响,枣林地 1 m 内土壤含水量明显高于两年

中的其他时段(最高达到 12.5%),在这个时期里,2012 年的实测数据所率定的气孔阻力参数不能很好地反映实际情况,故总体上 2013 年 SW 模型蒸腾模拟精度稍差于 2012 年,但不论是参数率定年(2012 年: $E = 10.86\%$, $D' = 0.87$, $R^2 = 0.87$)还是模型检验年(2013 年: $E = 16.67\%$, $D' = 0.82$, $R^2 = 0.83$),SW 模型都满足可信度评价指标。

通过人工调试确定参数 r_s^* 为定值 1 200 s/m。虽然模拟结果较为满意,但该调参过程依赖建模者的经验,同时无法保证模型获得最优解。因此,以 1 200 为 r_s^* 初始值,尝试使用遗传算法求解 r_s^* ,结果并不理想(未列出),SW 模型精度未得到进一步提高。这说明即使在监测样本较大的情况下,由于 SW 模型复杂的非线性,全局最优的模型参数依然不容易求解。此外, Li 等^[18] 和 Zhu 等^[22] 利用 Bayesian 方法推算 SW 模型参数,但求解过程过于复杂,有待进一步研究。

山地条件下表层水分空间变异性强,地表阻力(r_s^*)主要由表层土壤物理性质决定。如图 7 所示,枣树生育期内表层(0~20 cm)土壤含水量受环境因子影响变化剧烈,固定值 1 200 s/m 不可能一直很好地代表土壤阻力状况,而根据两年的蒸腾量模拟效果,人为选定的 r_s^* 经验数值能使 SW 模型获得满意结果,这进一步证实在干旱条件下,SW 模型对 r_s^* 不敏感^[4]。

2.2 基于 SW 和 PM 模型的山地枣林日蒸散量模拟

由于缺少日蒸发量实测数据,不能计算日蒸散量实测值,但根据水量平衡原理,可以计算出 10 d 尺度上的枣林蒸散量。为检验 SW 和 PM 模型的精度,分别将两个模型日蒸散量的模拟值在对应时段内求和,与实测蒸散值进行对比(表 2)。2012 年和 2013 年 SW 模型检验结果分别为: E 为 9.13% 和 9.97%, D' 为 0.93 和 0.87, R^2 为 0.97 和 0.89; PM 模型的检验结果分别为: E 为 15.33% 和 17.94%, D' 为 0.79 和 0.77, R^2 为 0.62 和 0.74。可见,对于

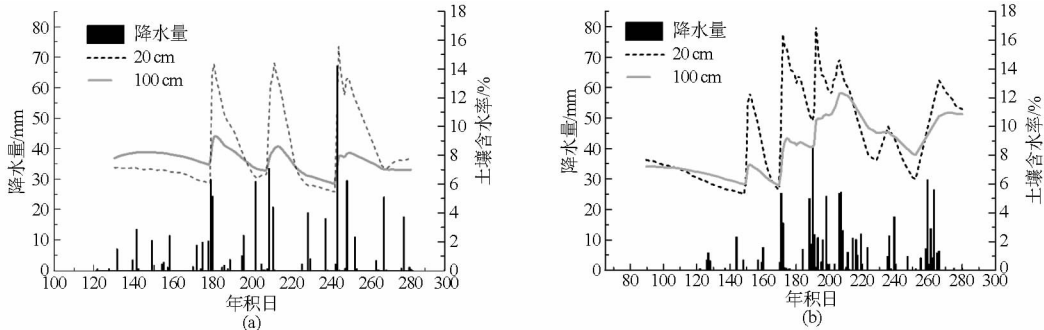


图 7 2012 年和 2013 年枣树生育期里降水量和土壤含水量(0~20 cm 和 0~100 cm)变化曲线

Fig. 7 Daily variations of precipitation and soil water content(0~20 cm and 0~100 cm) during jujube growth seasons in 2012 and 2013

(a) 2012 年 (b) 2013 年

10 d 尺度蒸散量,SW 模型精度远高于 PM 模型,且满足可信度评价指标,而 PM 模型不满足可信度评价指标(D' 和 R^2 均小于 0.8)。此外,SW 和 PM 模型精度在枣树各生育期间存在差异。SW 模型仅在萌芽展叶期误差较大(2012 年 E 为 15%,2013 年 E 为

17.58%),其余各时期 E 均小于 10%。PM 模型仅在开花坐果期精度较高(2012 年 E 为 4%,2013 年 E 为 5.84%),其余各个时期的误差均大于 SW 模型,果实成熟期 PM 的误差最大(2012 年 E 为 31%,2013 年 E 为 22.76)。

表 2 PM 和 SW 模型山地枣林蒸散量模拟精度验证(10 d 尺度)

Tab.2 Validation of performance of SW and PM model in ET estimation at 10 d scale

年份	生育期	年积日	降水量/ mm	ET 测量值/ mm	ET 模拟值/mm		E/%	
					SW	PM	SW	PM
2012	I	131—136	7.1	14.32	16.74	17.24	17.1	20.5
		137—147	17.6	27.60	31.73	37.58	15.0	36.2
		148—157	16.5	31.41	36.03	35.19	14.7	12.1
		158—165	12.6	27.50	30.72	28.79	11.7	4.7
	II	166—173	9.6	30.12	33.59	30.95	11.6	2.8
		174—183	73.8	31.31	34.25	31.92	9.4	2.0
		184—192	7.0	29.41	31.55	27.68	7.3	5.9
	III	193—204	45.6	42.02	45.74	41.51	8.9	1.2
		205—215	57.5	34.65	32.18	26.00	7.1	25.0
		216—225	0	40.10	42.85	35.40	6.9	11.7
		226—233	24.9	23.81	25.8	22.22	8.4	6.7
		234—247	86.5	53.22	55.55	42.62	4.4	19.9
	IV	248—257	41.8	29.05	30.85	15.04	6.2	48.2
		266—276	24.5	31.10	33.97	26.57	9.2	14.6
		277—283	19.8	17.16	15.78	11.94	8.0	30.4
2013	I	129—143	1.0	32.6	36.9	44.2	13.19	35.58
		143—152	14.4	33.2	25.9	23.8	21.99	28.31
	II	152—174	59.0	77.0	80.4	74.5	4.42	3.25
		174—184	9.0	44.2	46.3	47.6	4.75	7.69
		184—196	109.8	41.1	38.2	38.4	7.06	6.57
	III	196—201	26.6	26.2	24.0	22.0	8.40	16.03
		201—208	66.4	27.1	24.6	23.2	9.23	14.39
		208—217	33.0	46.5	43.3	41.1	6.88	11.61
		217—224	20.2	22.2	24.4	25.9	9.91	16.67
		224—232	0	34.7	30.7	26.1	11.53	24.78
	IV	232—239	34.2	18.6	16.9	14.3	9.14	23.12
		248—255	4.8	18.2	18.9	20.1	3.85	10.44
		255—259	37.0	9.5	7.9	6.2	16.84	34.74

注:野外测量受到天气状况等的影响,时段长度并不是严格的 10 d,但并不影响 ET 的计算和对模型精度的检验。

L 在 2 个模型中均用于描述冠层生长状况,其测量精度影响模型精度。尤其在 L 较小时,由于野外拍摄或室内冠层照片分析造成的误差相对较大,模型精度降低^[13,24],使得 SW 和 PM 模型在萌芽展叶期的蒸散量模拟误差较大,2012 年 E 分别为 14.63% 和 19.08%,2013 年分别为 17.59% 和 31.95%(表 2)。在开花坐果期末期 L 达到最大值,且此后各生育期枣树 L 基本恒定,SW 模型精度较萌芽展叶期增加且基本稳定($E \approx 8\%$),而 PM 模型精度波动较大,甚至比 L 较小时精度还低。

PM 模型为单源大叶模型(将植被冠层看成位于动量源汇处的一片大叶),假定叶片均匀分布于下垫面,认为下垫面各向同性,将植被冠层和土壤当作一层,忽略了植被冠层与土壤之间的水热差

异^[8]。对于冠层郁闭度高的稠密作物(比如牧草、小麦等),这个假设基本符合,因此 PM 模型用于稠密作物蒸散量估算精度普遍得到认可,而对于稀疏种植植被,比如此文中的枣林,行间和株间裸露地表较多,冠层郁闭假设不成立,且随着生育期里枣树叶面积的增加,日蒸发量和蒸腾量在日蒸散量中所占的比值在不断变化(图 8,图中 I ~ IV 分别代表萌芽展叶期、开花坐果期、果实膨大期和果实成熟期),蒸腾与蒸发的通量源汇面存在较大差异,因此,PM 模型在稀疏种植的枣林蒸散量估算中精度并不高,而且该模型只能估算出总蒸散量,不能将蒸发量和蒸腾量分开模拟。在开花坐果期里,枣林地蒸发量和蒸腾量大约各占一半(图 8),这个阶段枣树蒸腾比值与土壤蒸发比值基本一致,因而精度较高,随着

L 的增大,枣树蒸腾比值与土壤蒸发比值的差异变大(图 8),精度明显降低(表 2)。SW 模型为双源模型(将植被冠层和土壤表面看成 2 个既相互独立又相互作用的水汽源),考虑了植被冠层与土壤之间的水热差异,并可实现蒸发量和蒸腾量的分开模拟。SW 模型精度在很多植被蒸散模拟中都得到了认可。

图 8 还展示了 2012 年和 2013 年日蒸发量在日蒸散量中所占的比值随时间的变化情况,为

2012 年 $y = 49.4D_{oy}^{-0.9}$ ($R^2 = 0.68$) (36)

2013 年 $y = 43.8D_{oy}^{-0.9}$ ($R^2 = 0.70$) (37)

式中 y ——日蒸发量与蒸散量的比值

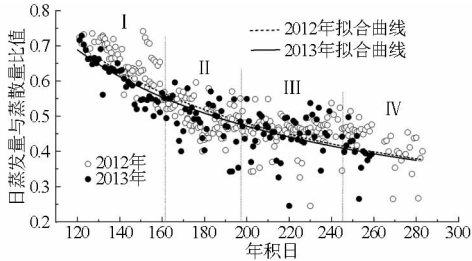


图 8 SW 模型估算的山地枣林全生育期日蒸发量与蒸腾量比值

Fig. 8 Dynamics of ratio of daily evaporation to evapotranspiration for jujube forest over growth season by SW model

2.3 SW 模型在陕北山地枣林蒸散量模拟中的适用性分析

SW 和 PM 模型均是基于梯度扩散理论(K-theory),而 Dolman 等^[25]监测到冠层中物质沿浓度梯度相反方向运移的现象,对 K-theory 的合理性提出了质疑。Raupach 等^[26]建立的基于 Lagrangian-theory 的模型能较好解释这一现象,但这类模型需要复杂的冠层结构数据,同时在进行长时间序列或者大空间尺度运算时,需要的时间成本过高^[27]。此外,Dolman 等^[25]对比了基于 K-theory 的 PM 和 SW 模型和基于 Lagrangian-theory 的模型后认为,在稀疏植被上 SW 模型与 Lagrangian 模型的模拟精度均优于 PM 模型,但二者之间差异不明显。Federer 等^[28]和 Fisher 等^[12]比较了 PM 和 SW 模型在草地、林地等植被条件下的潜在蒸散量模拟精度,认为 SW 模型在各植被条件下的精度均优于 PM 模型。雨养条件下,陕北 10 a 生山地枣林郁闭度仅为 40%,SW 和 PM 模型精度的比较结果与前人类似(表 2)。此外,SW 模型为双源耦合模型,能够单独

模拟蒸发和蒸腾过程,检验结果表明其能够很好地模拟日蒸腾量(图 5)。陕北黄土半干旱丘陵区,由于水资源的限制,人工林或者天然林的郁闭度或 L 较低,无论基于模型理论和精度考虑,SW 模型均是适宜的蒸散量模拟模型。

2.4 SW 模型在应用中应注意的问题

尽管 SW 模型的精度与单源 PM 模型比较有较大的提高,但是模型计算复杂,参数较多且验证难度大,同时随着参数的增加,累计误差也会不断增加。模型模拟效果主要取决于参数的率定,因此为进一步提高 SW 模型的估算精度,应尝试将一些成熟、复杂的数学方法,比如贝叶斯参数估计方法引入 SW 模型参数的率定中^[1,18]。

另外,尽管 SW 模型能将蒸腾与蒸发分开计算,但模型假设土壤均一化,不考虑地表湿润程度和湿润面积对蒸发蒸腾模型估算效果的影响。在天然植被、雨养农业(本文属于此情况)和采用传统灌溉方式的地区,由于土壤含水率分布相对比较均匀,地表阻力的空间变异性较小,SW 模型能取得比较好的模拟精度。但是,在使用沟灌、滴灌、小管出流等局部湿润节水灌溉技术的地区,地表湿润状况的空间变异性很大,蒸发蒸腾量的估算就必须考虑局部灌溉方式的影响,有针对性地对 SW 模型进行改进,比如将土壤蒸发进一步细分为干燥部分地表蒸发和湿润部分地表蒸发等,构建适合的耗水量模拟模型,以进一步提高模拟精度^[14,23,29]。

3 结论

- (1)根据陕北山地枣林的立地条件和蒸散过程特点,结合 2012 年的实测资料,确定了相关模型参数,实现了 Shuttleworth – Wallace (SW) 和 Penman – Monteith (PM) 模型对枣林蒸散量的模拟,并利用 2013 年茎流计监测的蒸腾量和水量平衡原理推求的蒸散量,对这 2 个模型进行了比较和检验。经过对比分析,认为 SW 模型日蒸腾量模拟精度满足要求,但受到天气状况影响,晴天模型精度优于雨天。
- (2)就整个枣树生育期 10 d 尺度蒸散量而言,SW 模型模拟精度优于 PM 模型,且满足模拟精度要求,而 PM 模型不满足精度要求。此外,2 模型精度随枣树生育期变化,在萌芽展叶期精度均最低。
- (3)SW 模型精度在陕北山地枣林里得到了充分的验证,是半干旱区山地枣林耗水规律研究的有效工具。

参 考 文 献

1 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.
- 2 Flumignan D L, Faria R T, Prete C E. Evapotranspiration components and dual crop coefficients of coffee trees during crop production [J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(5): 791 - 800.
- 3 Sun H Y, Shao L W, Liu X W, et al. Determination of water consumption and the water-saving potential of three mulching methods in a jujube orchard [J]. European Journal of Agronomy, 2012, 43: 87 - 95.
- 4 Wang Y, Shao M A, Zhu Y, et al. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(4): 437 - 448.
- 5 Wang Y, Shao M, Shao H. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China [J]. Journal of Hydrology, 2010, 381(1 - 2): 9 - 17.
- 6 魏新光, 陈滇豫, Liu Shouyang, 等. 修剪对黄土丘陵区枣树蒸腾的调控作用[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 194 - 202. Wei Xinguang, Chen Dianyu, Liu Shouyang, et al. Effect of trim on jujube transpiration in Loess Hilly region [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 194 - 202. (in Chinese)
- 7 吴普特, 汪有科, 韩宇平, 等. 孟岔生态型现代农业发展模式创建与启示[J]. 中国发展观察, 2008(11): 53 - 55.
- 8 Chen D Y, Wang Y K, Liu S Y, et al. Response of relative sap flow to meteorological factors under different soil moisture conditions in rainfed jujube (*Ziziphus jujuba*) plantations in semiarid northwest China [J]. Agricultural Water Management, 2014, 136: 23 - 33.
- 9 Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements—FAO Irrigation and drainage paper 56 [M]. Rome: UN-FAO, 1998.
- 10 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.
- 11 Shuttleworth W J, Wallace J. Evaporation from sparse crops—an energy combination theory [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1985, 111(469): 839 - 855.
- 12 Fisher J B, DeBiase T A, Qi Y, et al. Evapotranspiration models compared on a Sierra Nevada forest ecosystem [J]. Environmental Modelling & Software, 2005, 20(6): 783 - 796.
- 13 Ortega-Farias S, Poblete-Echeverria 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.
- 14 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 and Forest Meteorology, 2008, 148(10): 1629 - 1640.
- 15 刘守阳. 黄土丘陵沟壑区旱作山地枣林耗水规律研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- 16 Tuzet A, Perrier A, Leuning R. A coupled model of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration [J]. Plant, Cell & Environment, 2003, 26(7): 1097 - 1116.
- 17 Shuttleworth W J, Gurney R J. The theoretical relationship between foliage temperature and canopy resistance in sparse crops [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1990, 116(492): 497 - 519.
- 18 Li X, Yang P, Ren S, et al. An improved canopy transpiration model and parameter uncertainty analysis by Bayesian approach [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2010, 51(11 - 12): 1368 - 1374.
- 19 朱仲元, 王志强, 高瑞忠, 等. 基于 Shuttleworth - Wallace 双源模型的自然杨树蒸散量日变化研究[J]. 水利学报, 2007, 38(5): 582 - 590.
- 20 Zhou M, Ishidaira H, Hapuarachchi H, et al. Estimating potential evapotranspiration using Shuttleworth - Wallace model and NOAA - AVHRR NDVI data to feed a distributed hydrological model over the Mekong River basin [J]. Journal of Hydrology, 2006, 327(1 - 2): 151 - 173.
- 21 Ma L H, Wang Y K. Spatial distribution of roots in a dense jujube plantation in the semiarid hilly region of the Chinese Loess Plateau [J]. Plant and Soil, 2012, 354(1 - 2): 57 - 68.
- 22 Williams D, Cable W, Hultine K, et al. Evapotranspiration components determined by stable isotope, sap flow and eddy covariance techniques [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 125(3): 241 - 258.
- 23 Zhu G F, 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.
- 24 Zhang B Z, Kang S Z, Zhang L, et al. An evapotranspiration model for sparsely vegetated canopies under partial root-zone irrigation [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(11): 2007 - 2011.
- 25 Dolman A J, Wallace J S. Lagrangian and K-theory approaches in modelling evaporation from sparse canopies [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1991, 117(502): 1325 - 1340.
- 26 Raupach M. A practical Lagrangian method for relating scalar concentrations to source distributions in vegetation canopies [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1989, 115(487): 609 - 632.
- 27 van den Hurk B, McNaughton K. Implementation of near-field dispersion in a simple two-layer surface resistance model [J]. Journal of Hydrology, 1995, 166(3): 293 - 311.
- 28 Federer C, Vörösmarty C, Fekete B. Intercomparison of methods for calculating potential evaporation in regional and global water balance models [J]. Water Resources Research, 1996, 32(7): 2315 - 2321.
- 29 Li X Y, Yang P, Ren S, et al. Modeling cherry orchard evapotranspiration based on an improved dual-source model [J]. Agricultural Water Management, 2010, 98(1): 12 - 18.