

DOI: 10.5846/stxb201902220323

高冠龙,冯起,刘贤德.基于改进的双源模型模拟荒漠河岸胡杨林蒸散发.生态学报,2020,40(10):3462-3472.

Gao G L, Feng Q, Liu X D. Simulating evapotranspiration of the desert riparian *Populus euphratica* Olive. forest based on an improved dual-source model. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(10): 3462-3472.

基于改进的双源模型模拟荒漠河岸胡杨林蒸散发

高冠龙^{1,2,*}, 冯 起³, 刘贤德⁴

1 山西大学, 太原 030006

2 陕西省土地整治重点实验室, 西安 710064

3 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000

4 甘肃省祁连山水源涵养林研究院, 张掖 734000

摘要: 蒸散发是水循环和能量平衡过程中的重要组成部分,其准确量化对于深刻揭示干旱半干旱地区的生态水文过程具有重要意义。以黑河下游荒漠河岸胡杨林为研究对象,在 2014 和 2015 年胡杨主要生长季内,基于涡度相关技术实测数据,分析了蒸散发日及各物候期变化规律,结合改进的双源 Penman-Monteith-Priestley-Taylor (PM-PT) 模型,模拟了黑河下游荒漠河岸胡杨林蒸散发,并分析了模型的参数敏感性,得到的主要结论如下:(1) 胡杨林蒸散发日变化大致呈先升高后降低的趋势。上午随着太阳辐射的逐渐增强,气温逐渐升高,蒸散速率逐渐增大,在中午 12:00 左右达到峰值。随后,太阳辐射减弱,气温逐渐降低,空气中相对湿度增加,胡杨叶片内外水汽压差减小,蒸散速率随之降低。(2) 胡杨生长季内蒸散发整体上呈先升高后降低的趋势。2014 和 2015 年生长季蒸散发总量分别为 612 mm 和 658 mm,果期和种子散播期累积蒸散发为生长季内蒸散发总量的主体部分,果期内累积蒸散发分别为 316 mm 和 348 mm,分别占各年生长季蒸散发总量的 51.65% 和 52.87%;种子散播期内平均蒸散发略低于果期,2014 和 2015 年胡杨林种子散播期内累积蒸散发分别为 261 mm 和 271 mm,分别占各年生长季蒸散发总量的 42.71% 和 41.12%,展叶期和叶变色期内平均蒸散发最低,原因在于展叶期胡杨叶片尚未完全成形,而叶变色期叶片活性逐渐降低。(3) 改进的双源 PM-PT 模型与传统的双源 Shuttleworth-Wallace (SW) 模型相比,在模型结构与参数数量方面均得到了优化,其模拟精度也更高。(4) 改进的双源 PM-PT 模型对净辐射最为敏感。

关键词: 蒸散发;双源模型;荒漠河岸林;胡杨

Simulating evapotranspiration of the desert riparian *Populus euphratica* Olive. forest based on an improved dual-source model

GAO Guanlong^{1,2,*}, FENG Qi³, LIU Xiande⁴

1 College of Environment and Resource, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

2 Shaanxi Key Laboratory of Land Consolidation, Chang'an University, Xi'an 710064, China

3 Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

4 Academy of Water Resources Conservation Forests in Qilian Mountains of Gansu Province, Zhangye 734000, China

Abstract: Evapotranspiration (ET) is a key component of water cycles and energy balance, quantification of which is important for revealing the eco-hydrological processes in arid and semi-arid areas. Taking the desert riparian *Populus euphratica* Olive. forest as the study object, we studied the diurnal and phenological variations of ET based on the data measured from the eddy covariance instrument, simulated ET of the *P. euphratica* forest using an improved dual-source Penman-Monteith-Priestley-Taylor (PM-PT) model and analyzed the parameter sensitivity. Results showed that: (1) the

基金项目: 山西省应用基础研究面上青年基金项目(201801D221286);中国博士后科学基金资助项目(2018M643769);中央高校基本科研业务费(自然科学类)资助项目(300102279505);陕西省土地整治重点实验室开放基金项目(2018-JC13)共同资助

收稿日期:2019-02-22; 修订日期:2020-05-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gaoguanlong@sxu.edu.cn

diurnal variations of ET of the *P. euphratica* forest both increased firstly, and then decreased during the growing seasons in 2014 and 2015, respectively. With the enhancement of solar radiation in the forenoon, the temperature raised gradually, ET increased and peaked at about 12:00. Afterwards, solar radiation weakened, the temperature decreased gradually, the relative humidity increased and the vapor pressure deficit decreased, and ET decreased accordingly. (2) The seasonal variations of ET of the *P. euphratica* forest increased firstly, and then decreased. Total ET during the growing seasons in 2014 and 2015 were 612 mm and 658 mm, respectively. ET accumulated in fruit and seed dispersal periods were the main parts, especially in fruit period. The accumulated ET were 316 mm and 348 mm, accounting for 51.65% and 52.87% of total ET in each growing season in 2014 and 2015, respectively. The average values of ET in seed dispersal period were slightly lower than those in fruit stage. The accumulated ET were 261 mm and 271 mm, accounting for 42.71% and 41.12% of total ET in each growing season in 2014 and 2015, respectively. Because the leaves of *P. euphratica* were not fully formed in leaf development stage and the leaf activity decreased gradually in leaf discoloration stage, the average values of ET in both stages were the lowest. (3) Compared with the traditional dual-source Shuttleworth-Wallace (SW) model, the improved dual-source PM-PT model is optimized in terms of the model structure and parameter numbers, and its accuracy is also higher. (4) The improved PM-PT model had the greatest sensitivity to net radiation.

Key Words: evapotranspiration; dual-source model; desert riparian forest; *Populus euphratica*

蒸散发,包括土壤、水体和植物冠层的水分蒸发以及冰雪升华、植物蒸腾等过程^[1],是气象、水文和生态学中的重要参数^[2],也是植物与环境之间质量和能量交换的重要组成部分^[3-7],其准确量化对于合理制定灌溉方案、提高水资源利用效率具有重要意义^[8-9]。直接测定蒸散发的方法主要包括:液流法、波文比法、蒸渗仪法、稳定同位素法、涡度相关法、大孔径闪烁仪法和光合仪法等。然而,这些测定方法均是以昂贵的实验设备为基础,且需要专业人员进行维护,人力物力成本均较高^[10-11]。通过数学模型进行模拟,从单一气候变量驱动方程到能量平衡与空气动力学原理相结合的方法,可以有效地解决这一问题,近年来得到广泛关注^[12]。

目前最常用的蒸散发模型以辐射、温度和能量平衡作为运算基础^[13-15],主要包括:Penman (P) 模型、Penman-Monteith (PM) 模型、Priestley-Taylor (PT) 模型、McNaughton-Black (MB) 模型、Shuttleworth-Wallace (SW) 模型和 Clumping (C) 模型等。国内外学者们对于上述各模型的应用非常广泛,研究主要集中于不同模型模拟精度的对比^[16-26]及模型中部分参数计算方法的改进方面^[27-30],以此来提高模型的模拟精度。上述各模型中,PM 模型具有模型结构简单、所需参数较少的优点,被认为是理论性最强的蒸散发模型^[31],已被广泛应用于农田、森林、湿地等生态系统的蒸散发模拟^[32]。然而,PM 模型为单源模型,当植被呈斑块状分布或叶面积指数较小时,PM 模型的适用性会受到限制。这种情况下,双源 SW 模型的模拟精度往往较高,但是 SW 模型结构复杂,包含的参数较多,在参数的准确量化与模拟计算方面存在一定难度。因此,如何改进现有的模型,使其既能够适用于稀疏植被的蒸散发模拟,同时又能在模型结构与参数化方面得到优化,成为了学者们研究的热点。

胡杨是黑河下游额济纳绿洲主要的建群种,也是典型的荒漠河岸林树种,在我国西北地区极端干旱的气候条件下,植被正常生长所需的水分来源主要为地下水,而蒸散发是胡杨散失水分的最主要的途径。关于胡杨蒸散发的模拟研究,Gao 等^[33-34]分别基于单源和双源模型模拟了黑河下游胡杨林蒸散发,结果显示双源比单源模型具有更高的模拟精度。对于以胡杨为代表的稀疏植被而言,结构较为复杂的双源模型往往更加适用。然而,如何优化模型结构以提升模拟精度这一关键问题仍未得到解决。因此,本文基于改进的双源模型模拟胡杨林蒸散发,这对于弄清胡杨的蒸腾耗水机理、提高水分利用效率具有重要意义。

1 研究区概况

试验地位于额济纳绿洲,大致范围介于 99°03'—100°00'E,40°30'—42°30'W,属阿拉善台地的一部分,是

黑河末端的大型冲积扇,东为巴丹吉林沙漠,西为马鬃山山地,北到中蒙边界,南到黑河下游上端的鼎新绿洲,绿洲面积 $3.12 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。由西南部剥蚀低山残丘、中东部冲积平原、湖盆洼地与南部巴丹吉林沙漠等组成,海拔在 850—1100 m,总地形向东北倾斜;属极端大陆性气候,该地区年均降水量不足 40 mm,最少降水量为 7.0 mm;蒸发量高达 2500—4000 mm,空气相对湿度不足 35%;年均气温 8.6°C ,年均风速 4.4 m/s,全年 8 级以上大风日数平均 54 d,盛行偏西风,属极端干旱区。

试验样地位于内蒙古额济纳旗达镇东南的七道桥胡杨林保护区,共有胡杨树 80 株,为天然纯胡杨林。在该胡杨林保护区内,胡杨树木长势良好,树龄约为 32 a,树木平均高度为 10.2 m,平均胸径为 24.67 cm,平均冠幅为 442 cm $\times$ 450 cm。砂质土厚度约为 2 m,土壤体积含水量为 $0.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$,土壤容重为 $1.53 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

2 研究方法

2.1 试验设计

试验于 2014 和 2015 年胡杨主要生长季内(5 月 4 日—10 月 8 日),在额济纳旗七道桥胡杨林保护区内进行($42^\circ 21' \text{N}$, $101^\circ 15' \text{E}$,海拔高度为 920.5 m)。在胡杨林中部设有一个 24 m 高的涡度相关观测塔,塔上安装有一套开路式涡度相关测定系统,探头的安装高度为 20 m,该系统由三维超声风速系统(CSAT3)和开路式 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 红外分析仪(Li-7500A)组成。除该系统外,一些气象传感器也安装于铁塔不同高度处,包括四分量辐射仪、大气压探测器、空气温、湿度传感器、光合有效辐射仪、雨量筒,土壤热通量板及土壤水分探针分别埋设于地下不同位置及深度处。各仪器的名称、型号、生产厂商、安装高度(深度)、测定参数等信息见表 1。

表 1 样地内安装试验仪器的相关信息

Table 1 Information of the instruments installed in the study area

名称 Names	型号 Types	生产厂商/国家 Manufactures/Countries	高(深)度/m Heights/Depths	测定参数 Parameters
三维超声风速系统 3D sonic anemometer/thermometer	CSAT3	Campbell / 美国	20	三维风速/(m/s)
$\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 红外分析仪 Open-path $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ gas analyzer	7500A	LI-COR/美国	20	H_2O 浓度
四分量辐射仪 CNR-4 radiometers	CNR4	Kipp&Zonen/荷兰	10	净辐射/(W/m^2)
大气压探测器 Barometric pressure probes	CS106	LI-COR/美国	4	大气压(kPa)
大气温湿度探测器 Air temperature and relative humidity probes	HMP45C	Vaisala / 美国	8	大气温度($T_a/^\circ\text{C}$); 大气湿度(%)
	HC2S3	Campbell / 美国	4	大气温度($T_a/^\circ\text{C}$) 大气湿度(%)
光合有效辐射仪 Photosynthetically active radiation radiometers	LI-190SA	LI-COR/美国	6	光合有效辐射(W/m^2)
雨量筒 Rain gauge	RG3-M	Onset/美国	8	降雨量(mm)
土壤热通量板 Soil heat flux plates	HFP01	Hukseflux/荷兰	地下 0.05	土壤热通量(W/m^2)
土壤水分探针 Soil water content probes	SMC300	Spectrum/美国	地下 0.1; 0.3;0.5;0.8	土壤含水量(m^3/m^3)

叶面积指数由植物冠层分析仪(LAI-2200, Li-COR)测定,每 10 d 测定一次,于当天的黎明或黄昏时分进行测定。植物冠层分析仪选取 10° 遮盖角,首先在没有冠层遮盖的地方读取 1 个 A 值,然后在冠层下不同的点位读取 4 个 B 值,由此便可计算出 LAI 数值。重复操作 3 次,取平均值即为本时间段内胡杨林的叶面积指数。

2.2 数据处理

蒸散发数据由涡度相关系统获取。首先,运用 Loggernet 4.0 软件对原始数据进行数据分割及格式转换,

分割后的数据时间间隔为 30 min, 格式为 TOB1。然后用 Eddypro 5.2.0 软件对分割后的数据进行基本处理, 包括异常值剔除、倾斜校正、时间滞后校正、频率响应校正、超声虚温校正及密度效应校正。对于原始数据 (包括脉冲计数与消除、振幅分辨率、信号丢失、绝对限值、偏移度与峰值等) 的分析, 处理方法均来源于 Vickers 和 Mahrt^[35], 而对于数据的质量检查则依据 CARBOEUROPE 标准。经过上述处理后的数据仍然存在异常值, 需要再剔除一部分数据, 包括降水时次的数据、 $R_n < 10 \text{ W/m}^2$ 的数据以及 $\lambda ET > 800 \text{ W/m}^2$ 的数据。

由于仪器自身问题、维护和标定、自然环境条件的限制等原因, 一年中通常有 17—50% 的观测数据缺失或被剔除^[36-37]。本试验中, 异常值剔除后, 有效数据的比例分别为 82.63% (2014) 和 80.89% (2015)。本文采用的数据插补方法为: 2 h 以内的缺失数据采用线性内插法插补, 超过 2 h 的缺失数据采用平均昼夜变化法进行插补^[38]。鉴于夜间湍流运动很弱, 涡度相关数据质量较差, 且夜间蒸散发微弱, 实际蒸散发取日间时段 (8:00—19:00) 的蒸散发之和作为全天蒸散发总量, 以消除夜间质量差的数据对实际结果的影响。待所有涡度相关数据处理完毕后, 可得 2014 和 2015 年胡杨林能量闭合率 (图 1)。

2.3 蒸散发模型介绍

PM 模型将下垫面看作一个整体, 是单源模型, 其公式如下:

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + (\rho C_p D / r_a)}{\Delta + \gamma(1 + (r_c / r_a))}$$

式中, ET 为总蒸散发, mm/d ; λ 为汽化潜热, MJ/kg ; Δ 为饱和水汽压-温度曲线的斜率, kPa/K ; γ 为空气湿度常数, kPa/K ; ρ 为平均空气密度, kg/m^3 ; C_p 为空气定压比热, $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$; D 为饱和水汽压差, kPa ; u 为风速, m/s ; r_c 为冠层表面阻力, s/m ; r_a 为空气动力学阻力, s/m ; 其余参数意义同上。

SW 模型假设作物冠层为均匀覆盖, 引入冠层阻力和土壤阻力参数, 综合考虑了来自冠层和土壤两个涌源的蒸散发过程, 适用于稀疏植被的蒸散发模拟, 其计算公式如下:

$$\begin{aligned} \lambda ET &= \lambda E_c + \lambda E_s = C_c PM_c + C_s PM_s \\ PM_s &= \frac{\Delta A_c + [\rho C_p D - \Delta r_a^s (A_c - A_s)] / (r_a^a + r_a^s)}{\Delta + \gamma \left[1 + \frac{r_s^s}{r_a^a + r_a^s} \right]} \\ PM_c &= \frac{\Delta A_c + [\rho C_p D - \Delta r_a^c A_s] / (r_a^a + r_a^c)}{\Delta + \gamma \left[1 + \frac{r_s^c}{r_a^a + r_a^c} \right]} \\ C_s &= \frac{R_c (R_s + R_a)}{R_s R_c + R_c R_a + R_s R_a} = \frac{1}{1 + \frac{R_s R_a}{R_c (R_s + R_a)}} \\ C_c &= \frac{R_c (R_s + R_a)}{R_s R_c + R_c R_a + R_s R_a} = \frac{1}{1 + \frac{R_c R_a}{R_s (R_c + R_a)}} \\ R_a &= (\Delta + \gamma) r_a^a \end{aligned}$$

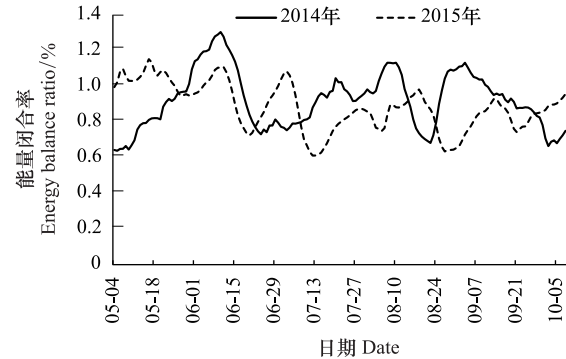


图 1 2014 和 2015 年胡杨林能量闭合率
Fig. 1 Energy balance ratios during the growing seasons of *Populus euphratica* in 2014 and 2015, respectively

$$R_c = (\Delta + \gamma) r_a^c + \gamma r_s^c$$

$$R_s = (\Delta + \gamma) r_a^s + \gamma r_s^s$$

式中, C_s 和 C_c 为分配系数; PM_s 为冠层下部土壤潜热通量, W/m^2 ; PM_c 为冠层潜热通量, W/m^2 ; A_t 为总有效辐射能量, W/m^2 ; A_s 为地面有效能量, W/m^2 ; r_a^a 为冠层面高度到参考面高度间的空气动力阻力, s/m ; r_a^s 为地表面到冠层面的空气动力阻力, s/m ; r_a^c 为单位面积冠层叶面边界层空气动力阻力, s/m ; r_s^s 为地表面土壤阻力, s/m ; r_s^c 为冠层阻力, s/m ; R_{ns} 为地表净辐射能量, W/m^2 ; 其余参数意义同上。

为了有效地平衡 PM 与 SW 模型在适用性与参数化等方面的优缺点, 可以考虑将 PT 模型引入 PM 模型, 进而推导出改进的双源 (PM-PT) 模型。公式如下:

$$E_c = \frac{1}{\lambda} \frac{\Delta R_{nc} + (\rho C_p D / r_a^c) + \Delta (1 - \alpha_E \tau) (R_n - G) (r_a^a / r_a^c)}{\Delta + \gamma (1 + (r_s^c / r_a^c)) + (\Delta + \gamma) (r_a^a / r_a^c)}$$

$$E_s = \alpha_E \tau \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} (R_n - G) \begin{cases} \tau \ll \tau_c, \alpha_E = 1 \\ \tau > \tau_c, \alpha_E = \alpha - (\alpha - 1) (1 - \tau) (1 - \tau_c) \end{cases}$$

式中, $\tau = R_{ns} / R_n$, α_E 为受光系数, τ_c 为常数 ($0.55^{[27]}$), 其余参数意义同上。

2.4 模拟精度评定指标及敏感性系数

本文引用 Legates 和 McCabe^[39] 研究中所选用的三个数据指标来评定模型的模拟精度: 修正效率系数 (E_1)、修正一致系数 (d_1) 和平均绝对误差 (MAE)。各系数计算公式为:

$$E_1 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |O_i - M_i|}{\sum_{i=1}^N |O_i - \bar{O}_i|}$$

$$d_1 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |O_i - M_i|}{\sum_{i=1}^N (|O_i - \bar{O}_i| + |M_i - \bar{O}_i|)}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |O_i - M_i|}{N}$$

式中, O_i 为实测蒸散发, mm; M_i 为模拟蒸散发, mm; $\bar{O}_i$ 为实测平均蒸散发, mm; N 为样本总数。如果 R^2 、 E_1 和 d_1 的值较大而 MAE 的值较小, 且斜率接近于 1, 则该模型模拟精度高。

本文采用 Zhan 等^[40] 提出的简便方法以进行敏感性分析:

$$S_p = \left| \frac{ET_- - ET_+}{ET_0} \right|$$

式中, S_p 为敏感性系数, ET_0 、 ET_- 和 ET_+ 分别为各参数值取 P_0 、 $1.1 P_0$ 和 $0.9 P_0$ (P_0 为各参数原始数值) 时对应的蒸散发值。

3 结果与分析

3.1 荒漠河岸胡杨林实际蒸散发

3.1.1 蒸散发日变化规律

在 2014 和 2015 年胡杨主要生长季内, 选取生长季初期连续 10 天 (5.4—5.13) 的蒸散发实测数据, 用以分析蒸散发日变化规律。选择生长季初期作为研究时段的原因在于: 5 月初胡杨林试验地地表植被还未开始生长, 不会对生态系统实际蒸散发产生影响。

由图 2 可以看出, 胡杨林蒸散发日变化大致呈先升高后降低的趋势。上午随着太阳辐射的逐渐增强, 气温逐渐升高, 蒸散速率逐渐增大, 在 12:00 左右达到峰值。随后, 太阳辐射减弱, 气温逐渐降低, 空气中相对湿度增加, 胡杨叶片内外水汽压差减小, 蒸散速率随之降低。有些天内蒸散速率在 17:00 前后还会出现一个峰

值,这是由于在这些天 12:00—17:00 时间段内气温过高致使胡杨叶片气孔关闭。

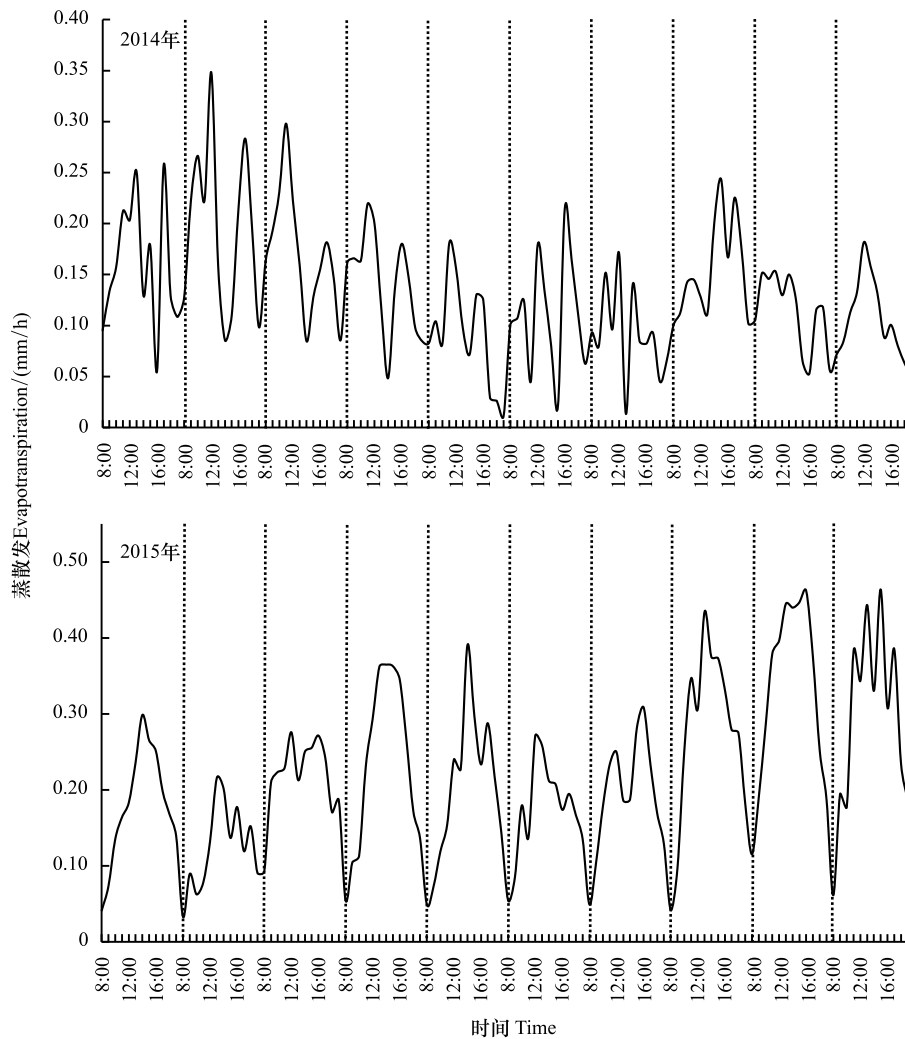


图 2 2014 和 2015 年胡杨生长季初期连续 10 天蒸散发日变化规律

Fig.2 Diurnal variations of evapotranspiration during the first 10 days at the early stage of the growing seasons of *Populus euphratica* in 2014 and 2015, respectively

3.1.2 蒸散发各物候期变化规律

2014 和 2015 年试验地胡杨主要生长季及各物候期蒸散发变化规律见图 3 和图 4。可以看出,胡杨主要生长季内蒸散发整体上呈先升高后降低的趋势,2014 和 2015 年生长季蒸散发总量分别为 612 mm 和 658 mm。果期和种子散播期累积蒸散发为生长季内蒸散发总量的主体部分,果期内累积蒸散发分别为 316 mm 和 348 mm,分别占各年生长季蒸散发总量的 51.65%和 52.87%,平均蒸散发分别为 4 mm 和 5 mm。种子散播期内平均蒸散发略低于果期,2014 和 2015 年胡杨林种子散播期内累积蒸散发分别为 261 mm 和 270 mm,分别占各年生长季蒸散发总量的 42.71%和 41.12%,平均蒸散发均为 4 mm。展叶期和叶变色期内平均蒸散发最低,展叶期累积蒸散发分别为 15 mm 和 23 mm,分别占各年生长季蒸散发总量的 2.51%和 3.50%,平均蒸散发分别为 12 mm 和 3 mm;叶变色期累积蒸散发分别为 19 mm 和 17 mm,分别占各年生长季蒸散发总量的 3.14%和 2.51%,平均蒸散发均为 2 mm。

3.2 荒漠河岸胡杨林蒸散发模拟

通过对比实测蒸散发与 SW、PM-PT 模型模拟的蒸散发结果,进而可确定各模型的模拟精度。2014 和

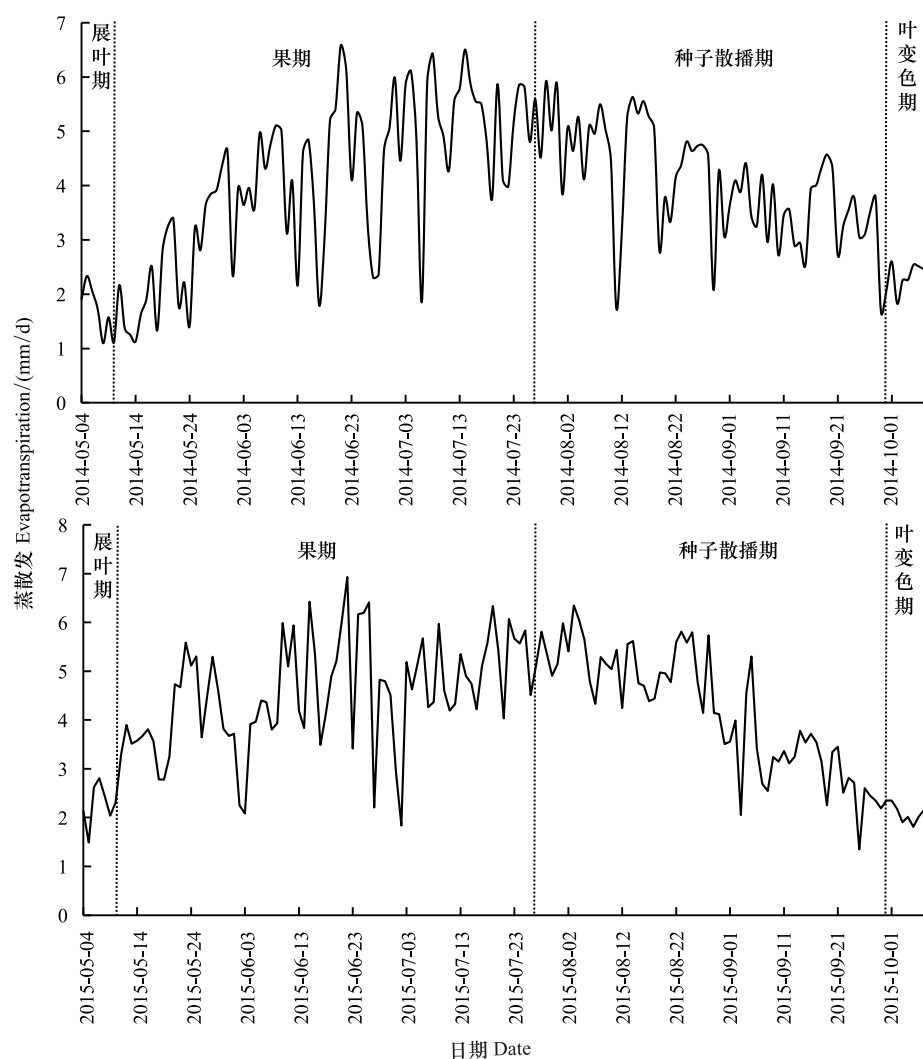


图3 2014和2015年试验地胡杨主要生长季及各物候期蒸散发变化规律

Fig.3 Variations of evapotranspiration during the whole growing seasons and each stage of *Populus euphratica* in 2014 and 2015, respectively

2015年胡杨主要生长季实测蒸散发与SW、PM-PT模型模拟蒸散发对比见图5、6和表2。可以看出,2014和2015年胡杨主要生长季内,PM-PT模型其修正效率系数(0.433、0.321)、修正一致系数(0.696、0.629)和决定系数(0.752、0.655)均高于SW模型各系数值(修正效率系数(0.162、0.167)、修正一致系数(0.548、0.542)和决定系数(0.575、0.586)),而PM-PT模型平均绝对误差(0.655、0.746)小于SW模型(0.969、0.916),且PM-PT模型的斜率(0.716、0.616)更接近于1,说明PM-PT模型的模拟效果更好。

3.3 敏感性分析

模型参数的敏感性分析对于量化模型的不确定性至关重要。本文针对模拟精度更高的PM-PT模型对其参数敏感性进行分析,结果见表3。可以看出,2014和2015年胡杨主要生长季内,PM-PT模型对于净辐射的敏感系数值最高,说明模拟蒸散发对净辐射最为敏感。

4 讨论

蒸散发的准确测定与估算对于理解陆-气相互作用及水文过程具有重要意义。从荒漠河岸胡杨林实测蒸散发来看,其日变化大致呈先升高后降低的趋势。上午随着太阳辐射的逐渐增强,气温逐渐升高,蒸散速率

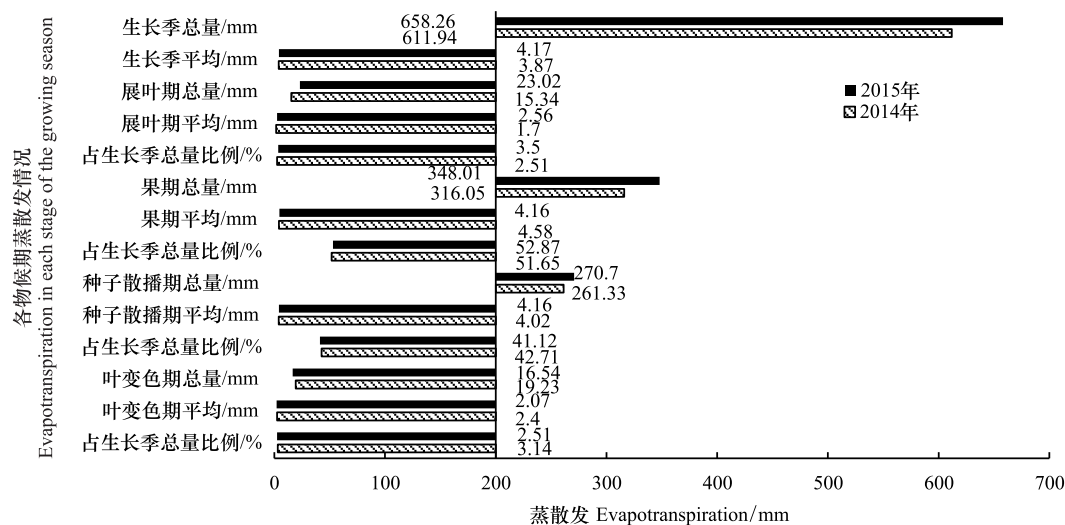


图4 2014和2015年试验地胡杨主要生长季及各物候期蒸散发对比

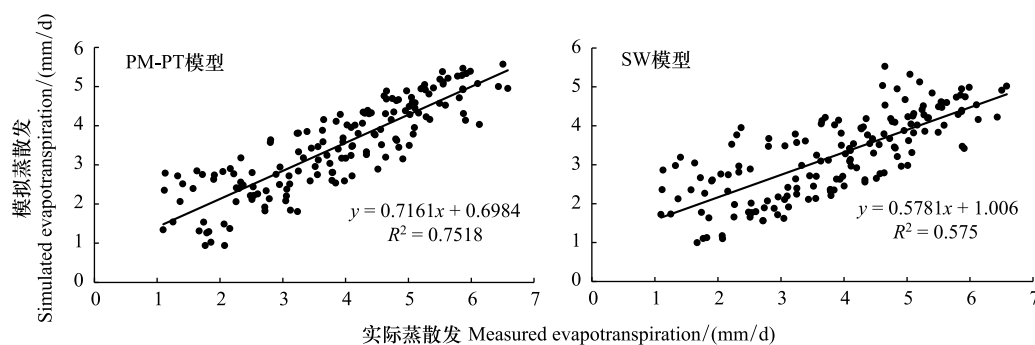
Fig.4 Comparison of evapotranspiration during the growing seasons and each stage of *Populus euphratica* in 2014 and 2015, respectively

图5 2014年胡杨主要生长季实测蒸散发与SW、PM-PT模型模拟蒸散发对比

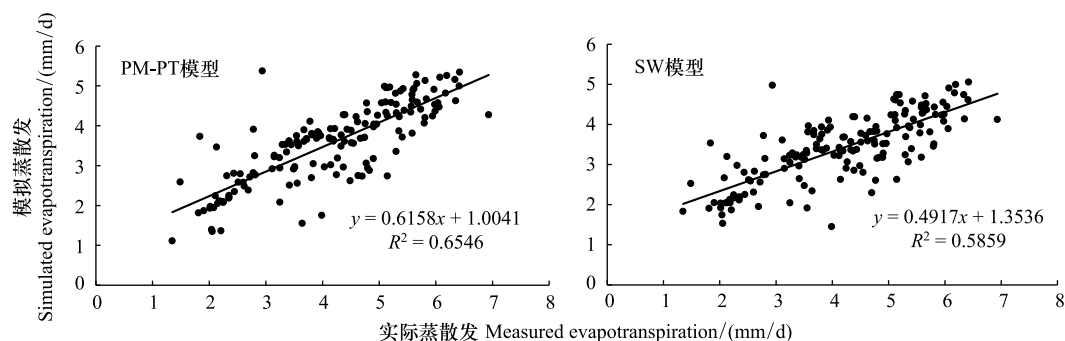
Fig.5 Comparison between the measured and simulated evapotranspiration of *Populus euphratica* in 2014

图6 2015年胡杨主要生长季实测蒸散发与各模型模拟蒸散发对比

Fig.6 Comparison between the measured and simulated evapotranspiration of *Populus euphratica* in 2015

逐渐增大,在 12:00 左右达到峰值。随后,太阳辐射减弱,气温逐渐降低,空气中相对湿度增加,胡杨叶片内外水汽压差减小,蒸散速率随之降低。有些天内蒸散速率在 17:00 前后还会出现一个峰值,这是由于在这些天 12:00—17:00 时间段内气温过高致使胡杨叶片气孔关闭。胡杨主要生长季内蒸散发整体上也呈先升高后降

低的趋势,果期和种子散播期累积蒸散发为生长季内蒸散发总量的主体部分,展叶期和叶变色期内平均蒸散发最低,原因在于展叶期胡杨叶片尚未完全成形,而叶变色期叶片活性逐渐降低。

表 2 2014 和 2015 年胡杨主要生长季 SW 和 PM-PT 模型模拟精度对比
Table 2 Comparison of accuracies between the SW and PM-PT models in 2014 and 2015, respectively

模型 Model	修正效率系数/mm Modified coefficient of efficiency	修正一致系数/mm Modified index of agreement	平均绝对误差/mm Mean absolute error	决定系数 Determination coefficient	斜率 Slope
PM-PT 模型(2014) PM-PT model (2014)	0.433	0.696	0.655	0.752	0.716
SW 模型(2014) SW model (2014)	0.162	0.548	0.969	0.575	0.578
PM-PT 模型(2015) PM-PT model (2015)	0.321	0.629	0.746	0.655	0.616
SW 模型(2015) SW model (2015)	0.167	0.542	0.916	0.586	0.492

表 3 基于 LAI、 R_n 、 G 、 D 和 u 的 PM-PT 模型参数敏感性分析
Table 3 Sensitivity analysis of the PM-PT model based on the parameters of LAI, R_n , G , D and u

敏感性系数 Sensitivity coefficient	叶面积指数 Leaf area index	净辐射 Net radiation	土壤热通量 Soil heat flux	水汽压差 Vapor pressure deficit	风速 Wind speed
S_p (2014)	0.048	0.192	0.013	0.010	0.005
S_p (2015)	0.090	0.171	0.007	0.016	0.028

S_p :敏感性系数,Sensitivity coefficient

对于稀疏植被覆盖条件下的蒸散发模拟,SW 双源模型考虑了源自地表的水热通量首先在冠层高度与源自冠层的水热通量相互混合,进而与上方大气相互作用,近年来应用广泛。Hu 等^[41]基于 SW 模型,对四个不同试验点的草地生态系统蒸散发进行了模拟,结果表明在日和季节两个尺度上,SW 模型模拟精度均较高。然而,SW 模型在雨天天气条件下模拟精度有所降低,这主要是由于该模型未考虑冠层截留而产生影响。Zhu 等^[11]基于 SW 模型结合贝叶斯方法对青藏高原高山草甸蒸散发进行了模拟,并分析了模型参数的不确定性,结果表明 SW 模型模拟效果较好。Ortega-Farias 等^[42]基于 SW 模型对智利一个葡萄园蒸散发进行了模拟,结果表明在没有水分胁迫的情况下,利用气象和土壤水分数据模拟的蒸散发与实际观测值接近。沈竞等^[43]基于 SW 模型对蒸散发各组分进行了拆分,并采用蒙特卡洛随机参数化方案对模型参数进行了优化。赵丽雯等^[44]应用 SW 模型模拟了绿洲农田玉米生长季的实际蒸散发,并利用涡度相关技术进行了验证。然而,模型结构及所需参数数量均未得到优化。

本研究中,SW 模型模拟精度略低,原因在于其模型结构相对复杂,包含参数较多,各参数的准确量化较为困难,而各参数的不确定性往往又导致模拟结果的差异。另外,SW 模型的模拟误差可能产生的原因还在于:

(1)SW 模型没有考虑土壤和冠层间的反射率和长波辐射。Brenner 和 Incoll^[45]的研究结果表明,冠层和裸露土壤间最大长波辐射差约为 100 w/m²;

(2)不同能量来源之间的相互作用会对能量通量产生影响。Ham 和 Heilman^[46]的研究结果表明,约有 1/3 的感热通量用于了棉花蒸腾。

本文基于改进的双源 PM-PT 模型模拟了荒漠河岸胡杨林蒸散发,结果显示改进的双源 PM-PT 模型比双源 SW 模型模拟精度高,Li 等^[27]和 Sauer 等^[47]均得出了相同的结论。但是在 Li 等^[27]和 Sauer 等^[47]的研究中,试验均是在土壤水分充足的条件下进行的,而对于极端干旱条件下荒漠植被的蒸散发模拟而言,PM-PT 模型的模拟精度还有待进一步验证。本研究以荒漠河岸胡杨林为试验对象,分析了 PM-PT 模型在蒸散发模

拟方面的应用,由于 PM-PT 模型在模型结构与参数数量方面均得到了优化,因而未来关于 PM-PT 模型的适用性研究意义显著。

5 结论

本文基于黑河下游额济纳绿洲七道桥胡杨林生态-水文长期固定观测场的实测数据,运用涡度相关技术对胡杨林实际蒸散发进行了观测,通过双源 SW 和改进的双源 PM-PT 模型对蒸散发进行了模拟,并将实测数据与各模型模拟结果进行了比较,对比分析了各模型的模拟精度,并分析了模拟精度较高的 PM-PT 模型的参数敏感性。得到的主要结论如下:

(1) 荒漠河岸胡杨林蒸散发日及主要生长季内变化均呈先升高后降低的趋势。从日变化情况来看,蒸散发在中午 12:00 左右达到峰值。从生长季内变化情况来看,果期和种子散播期累积蒸散发为生长季内蒸散发总量的主体部分,展叶期和叶变色期内平均蒸散发最低;

(2) 2014 和 2015 年胡杨主要生长季内,改进的双源 PM-PT 模型与 SW 模型相比,在模型结构与参数数量方面均得到了优化,其模拟精度也高于 SW 模型;

(3) PM-PT 模型对于净辐射的敏感系数值最高,说明 PM-PT 模型对净辐射最为敏感。

参考文献 (References):

- [1] Maxwell R M, Condon L E. Connections between groundwater flow and transpiration partitioning. *Science*, 2016, 353(6297): 377-380.
- [2] Ács F. A comparative analysis of transpiration and bare soil evaporation. *Boundary-Layer Meteorology*, 2003, 109(2): 139-162.
- [3] 赵文智, 牛最荣, 常学礼, 李守波. 基于净初级生产力的荒漠人工绿洲耗水研究. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(10): 1431-1438.
- [4] Wei Z, Liu Y, Xu D, Cai J B, Zhang B Z. Application and comparison of winter wheat canopy resistance estimation models based on the scaling-up of leaf stomatal conductance. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(23): 2909-2916.
- [5] Wei Z W, Lee X, Wen X F, Xiao W. Evapotranspiration partitioning for three agro-ecosystems with contrasting moisture conditions: a comparison of an isotope method and a two-source model calculation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 252: 296-310.
- [6] Li X Y, He Y, Zeng Z Z, Lian X, Wang X H, Du M Y, Jia G S, Li Y N, Ma Y M, Tang Y H, Wang W X, Wu Z X, Yan J H, Yao Y T, Ciais P, Zhang X Z, Zhang Y P, Zhang Y, Zhou G S, Piao S L. Spatiotemporal pattern of terrestrial evapotranspiration in China during the past thirty years. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 259: 131-140.
- [7] 童雅琴, 王佩, 李小雁, 张赐成, 白岩. 黑河流域高寒草甸生态系统水分收支及蒸散发拆分研究. *生态学报*, 2018, 38(20): 7400-7411.
- [8] Byun K, Liaquat U, Choi M. Dual-model approaches for evapotranspiration analyses over homo- and heterogeneous land surface conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 197: 169-187.
- [9] Koudahe K, Djaman K, Adewumi J K. Evaluation of the Penman-Monteith reference evapotranspiration under limited data and its sensitivity to key climatic variables under humid and semiarid conditions. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2018, 4(3): 1239-1257.
- [10] Gharsallah O, Facchi A, Gandolfi C. Comparison of six evapotranspiration models for a surface irrigated maize agro-ecosystem in northern Italy. *Agricultural Water Management*, 2013, 130: 119-130.
- [11] Zhu G F, Su Y H, Li X, Zhang K, Li C B. Estimating actual evapotranspiration from an alpine grassland on Qinghai-Tibetan plateau using a two-source model and parameter uncertainty analysis by Bayesian approach. *Journal of Hydrology*, 2013, 476: 42-51.
- [12] 赵玲玲, 夏军, 许崇育, 王中根, 苏磊. 水文循环模拟中蒸散发估算方法综述. *地理学报*, 2013, 68(1): 127-136.
- [13] Mu Q Z, Zhao M S, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(8): 1781-1800.
- [14] Liou Y A, Kar S K. Evapotranspiration estimation with remote sensing and various surface energy balance algorithms—a review. *Energies*, 2014, 7(5): 2821-2849.
- [15] Zhang Z Z, Zhao P, McCarthy H R, Zhao X H, Niu J F, Zhu L W, Ni G Y, Ouyang L, Huang Y Q. Influence of the decoupling degree on the estimation of canopy stomatal conductance for two broadleaf tree species. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 221: 230-241.
- [16] Zhang B Z, Kang S Z, Li F S, Zhang L. Comparison of three evapotranspiration models to Bowen ratio-energy balance method for a vineyard in an arid desert region of northwest China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(10): 1629-1640.
- [17] Li S E, Zhang L, Kang S Z, Tong L, Du T S, Hao X M, Zhao P. Comparison of several surface resistance models for estimating crop evapotranspiration over the entire growing season in arid regions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 208: 1-15.
- [18] Feng Y, Cui N B, Zhao L, Hu X T, Gong D Z. Comparison of ELM, GANN, WNN and empirical models for estimating reference evapotranspiration in humid region of Southwest China. *Journal of Hydrology*, 2016, 536: 376-383.
- [19] Fisher J B, DeBiase T A, Qi Y, Xu M, Goldstein A H. Evapotranspiration models compared on a Sierra Nevada forest ecosystem. *Environmental Modelling & Software*, 2005, 20(6): 783-796.

- [20] Li S E, Kang S Z, Zhang L, Zhang Z H, Du T S, Tong L, Ding R S. Evaluation of six potential evapotranspiration models for estimating crop potential and actual evapotranspiration in arid regions. *Journal of Hydrology*, 2016, 543: 450-461.
- [21] Liu X Y, Xu C Y, Zhong X L, Li Y Z, Yuan X H, Cao J F. Comparison of 16 models for reference crop evapotranspiration against weighing lysimeter measurement. *Agricultural Water Management*, 2017, 184: 145-155.
- [22] Mao Y N, Wang K C. Comparison of evapotranspiration estimates based on the surface water balance, modified Penman-Monteith model, and reanalysis data sets for continental China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(6): 3228-3244.
- [23] Yang Z S, Zhang Q, Yang Y, Hao X C, Zhang H L. Evaluation of evapotranspiration models over semi-arid and semi-humid areas of China. *Hydrological Processes*, 2016, 30(23): 4292-4313.
- [24] Holder A J, McCalmont J P, McNamara N P, Rowe R, Donnison I S. Evapotranspiration model comparison and an estimate of field scale *Miscanthus* canopy precipitation interception. *GCB Bioenergy*, 2018, 10(5): 353-366.
- [25] Luo X Z, Chen J M, Liu J, Andrew Black B, Croft H, Staebler R, He L M, Arain M A, Chen B, Mo G, Gonsamo A, McCaughey H. Comparison of big-leaf, two-big-leaf, and two-leaf upscaling schemes for evapotranspiration estimation using coupled carbon-water modeling. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, 123(1): 207-225.
- [26] Wang Q L, He Q J, Zhou G S. Applicability of common stomatal conductance models in maize under varying soil moisture conditions. *Science of the Total Environment*, 2018, 628-629: 141-149.
- [27] Li X Y, Yang P L, Ren S M, Li Y K, Liu H L, Du J, Li P F, Wang C Y, Ren L. Modeling cherry orchard evapotranspiration based on an improved dual-source model. *Agricultural Water Management*, 2010, 98(1): 12-18.
- [28] Zhu G F, Su Y H, Li X, Zhang K, Li C B, Ning N. Modelling evapotranspiration in an alpine grassland ecosystem on Qinghai-Tibetan plateau. *Hydrological Processes*, 2014, 28(3): 610-619.
- [29] Ershadi A, McCabe M F, Evans J P, Wood E F. Impact of model structure and parameterization on Penman-Monteith type evaporation models. *Journal of Hydrology*, 2015, 525: 521-535.
- [30] Zhao P, Lüers J. Parameterization of evapotranspiration estimation for two typical East Asian crops. *Atmosphere*, 2017, 8(6): 111.
- [31] Yan H F, Zhang C, Gerrits M C, Acquah S J, Zhang H N, Wu H M, Zhao B S, Huang S, Fu H W. Parametrization of aerodynamic and canopy resistances for modeling evapotranspiration of greenhouse cucumber. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 262: 370-378.
- [32] Irmak S, Mutiibwa D, Payero J, Marek T, Porter D. Modeling soybean canopy resistance from micrometeorological and plant variables for estimating evapotranspiration using one-step Penman-Monteith approach. *Journal of Hydrology*, 2013, 507: 1-18.
- [33] Gao G L, Zhang X Y, Yu T F, Liu B. Comparison of three evapotranspiration models with eddy covariance measurements for a *Populus euphratica* Oliv. forest in an arid region of northwestern China. *Journal of Arid Land*, 2016, 8(1): 146-156.
- [34] Gao G L, Zhang X Y, Yu T F. Evapotranspiration of a *Populus euphratica* forest during the growing season in an extremely arid region of northwest China using the Shuttleworth-Wallace model. *Journal of Forestry Research*, 2016, 27(4): 879-887.
- [35] Vickers D, Mahrt L. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1997, 14(3): 512-526.
- [36] 徐自为, 刘绍民, 徐同仁, 王介民. 涡动相关仪观测蒸散量的插补方法比较. *地球科学进展*, 2009, 24(4): 372-382.
- [37] Falge E, Baldocchi D, Olson R, Anthoni P, Aubinet M, Bernhofer C, Burba G, Ceulemans R, Clement R, Dolman H, Granier A, Gross P, Grünwald T, Hollinger D, Jensen N O, Katul G, Keronen P, Kowalski A, Lai C T, Law B E, Meyers T, Moncrieff J, Moors E, Munger J W, Pilegaard K, Rannik Ü, Rebmann C, Suyker A, Tenhunen J, Tu K, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1): 43-69.
- [38] 同小娟, 张劲松, 孟平, 李俊. 黄河小浪底人工混交林冠层 CO₂ 储存通量变化特征. *生态学报*, 2015, 35(7): 2076-2084.
- [39] Legates D R, McCabe Jr G J. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 1999, 35(1): 233-241.
- [40] Zhan X, Kustas W P, Humes K S. An intercomparison study on models of sensible heat flux over partial canopy surfaces with remotely sensed surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(3): 242-256.
- [41] Hu Z M, Yu G R, Zhou Y L, Sun X M, Li Y N, Shi P L, Wang Y F, Song X, Zheng Z M, Zhang L, Li S G. Partitioning of evapotranspiration and its controls in four grassland ecosystems: application of a two-source model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(9): 1410-1420.
- [42] Ortega-Farias S, Poblete-Echeverría C, Brisson N. Parameterization of a two-layer model for estimating vineyard evapotranspiration using meteorological measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(2): 276-286.
- [43] 沈竞, 张弥, 肖薇, 温学发, 刘寿东, 李旭辉. 基于改进 SW 模型的千烟洲人工林蒸散组分拆分及其特征. *生态学报*, 2016, 36(8): 2164-2174.
- [44] 赵丽雯, 赵文智, 吉喜斌. 西北黑河中游荒漠绿洲农田作物蒸腾与土壤蒸发区分及作物耗水规律. *生态学报*, 2015, 35(4): 1114-1123.
- [45] Brenner A J, Incoll L D. The effect of clumping and stomatal response on evaporation from sparsely vegetated shrublands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 84(3/4): 187-205.
- [46] Ham J M, Heilman J L, Lascano R J. Soil and canopy energy balances of a row crop at partial cover. *Agronomy Journal*, 1991, 83(4): 744-753.
- [47] Sauer T J, Singer J W, Prueger J H, DeSutter T M, Hatfield J L. Radiation balance and evaporation partitioning in a narrow-row soybean canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 145(3/4): 206-214.