

不同冠层阻力公式在玉米田蒸散模拟中的应用*

李璐^{1,2} 李俊^{1**} 同小娟³ 杨永民⁴ 于强¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室 北京 100101; 2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 北京林业大学林学院 北京 100083; 4. 中国水利水电科学研究院 北京 100038)

摘要 在我国北方地区,水分供给一直是影响粮食产量的主要因素。玉米作为我国三大粮食作物之一,关乎其水分蒸散的观测和模拟一直是气象、水文、生态等相关学科的重要研究内容。研究玉米蒸散对于粮食安全、节水灌溉、提高作物水分利用效率具有重要意义。作为经典的双源模型, Shuttleworth-Wallace(SW)模型分别考虑土壤蒸发和植被蒸腾,非常适用于稀疏植被的蒸散估算。本文在 SW 模型中采用不同冠层阻力公式对玉米地蒸散进行模拟,并用涡度相关实测通量数据对模型的模拟效果进行验证。结果表明,采用 Jarvis 冠层阻力公式的 SW1 模型与采用 Kelliher-Leuning 冠层阻力公式的 SW2 模型模拟的蒸散量都与实测值吻合较好,相关系数均在 0.85 以上($P < 0.01$),一致性指数都达到 0.92 以上。敏感性分析表明, SW 模型估算蒸散对冠层阻力最敏感。在计算冠层阻力的各个参数中, SW1 模型估算蒸散对田间持水量最敏感,其次是最小气孔阻力和有效叶面积指数; SW2 模型估算蒸散对最大气孔导度最敏感。传统 SW 模型中,冠层阻力计算采用 Jarvis 公式,计算复杂。改用 Kelliher-Leuning 公式后,在一定程度上简化了模型的计算,更方便模型应用。

关键词 Shuttleworth-Wallace 模型 蒸散 冠层阻力 玉米田

中图分类号: S161.4 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2015)08-1026-09

Application of different canopy resistance models in summer maize evapotranspiration simulation

LI Lu^{1,2}, LI Jun¹, TONG Xiaojuan³, YANG Yongmin⁴, YU Qiang¹

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 4. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract In the northern area of China, water supply is a major factor limiting crop yield. Maize is one of three major crops in China. The observation and simulation of evapotranspiration (ET) in maize fields are important processes in meteorology, hydrology, ecology and the other related fields. Thus studies on maize ET are critical for ensuring food security, saving irrigation water and increasing crop water use efficiency. A classical two-layer ET model, the Shuttleworth-Wallace (SW) model is appropriate for estimating ET in sparse vegetation conditions where soil evaporation and vegetation transpiration are significant. In this study, we adopted the Jarvis and Kelliher-Leuning canopy resistance models in relation to SW model to construct SW1 model and SW2 model, respectively. The SW1 and SW2 models were used to simulate ET in a summer maize field in Yucheng Agricultural Experimental Station of Chinese Academy of Sciences. Also experiments were conducted to measure daily ET in summer maize field via eddy covariance system during the main growing period of 2003–2004. ET simulated by the two models was validated using measured flux data. The results suggested that ET obtained by the two models were consistent with observed data. Correlation coefficients of the measured and simulated ET were above 0.85 ($P < 0.01$) and the index of agreement of the measured and simulated data was over 0.92. The ratio of soil evaporation to ET decreased rapidly with increased leaf area index and that ratio for July was higher than those for Au-

* 国家自然科学基金项目(41371119, 41171086)和国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2012CB955304)资助

** 通讯作者: 李俊, 主要从事生态系统水、热、CO₂交换、温室气体生物源汇、气候变化和植被覆盖变化对区域水、碳过程的影响等方面研究。E-mail: lijun@igsrr.ac.cn

李璐, 主要从事生态系统水、热交换和区域蒸散模拟等方面研究。E-mail: a_sunbeam@126.com

收稿日期: 2015-01-18 接受日期: 2015-05-18

gust and September. At blossom and milk stage, both ET and soil evaporation reached maximum values. During this period, maize leaf growth was vegetative and with the largest canopy transpiration. Then ET and soil evaporation slowly decreased thereafter with gradual reduction in leaf area index, and with the ratio of soil evaporation to ET of 0.2. Sensitivity analysis showed that estimated ET by the SW model was most sensitive to the canopy resistance and the model sensitivity to canopy resistance increased with increasing leaf area index. At early growth stage of maize, the impact of soil surface resistance on ET was not negligible, especially with less vegetation cover. Among the parameters for canopy resistance calculation, estimated ET by SW1 model was most sensitive to change in field capacity. This was followed by minimum stomatal resistance and then effective leaf area index. SW2 model was most sensitive to maximum stomata conductance. Traditional SW model based on Jarvis's equation for canopy resistance calculation had a complex calculation with several parameters. Then SW2 model based on Kelliher-Leuning equation only had half of SW parameters and therefore considerably simplified the ET model calculation. Compared with SW1 model, SW2 model was much more convenient in terms of application in ET calculation.

Keywords Shuttleworth-Wallace model; Evapotranspiration; Canopy resistance; Maize field

(Received Jan. 18, 2015; accepted May 18, 2015)

蒸散是土壤-植被-大气连续体中水分传输的重要环节,也是生态系统乃至全球水文循环的重要组成部分。蒸散的观测和模拟一直是气象、水文、生态等相关学科的重要研究内容,对于农田旱情监测、节水灌溉、提高作物水分生产力有重要意义。近几十年来,随着技术进步,人们研发出各种蒸散测定方法,如涡度相关技术、波文比能量平衡法、大型蒸渗仪法等,蒸散的测定精度日益提高。在蒸散估算方面也有了长足进步。学者们发展了各种蒸散模型,用得较多的有 Penman-Monteith(PM)模型^[1]和 Shuttleworth-Wallace(SW)模型^[2]。PM 模型为单源模型,适合模拟稠密植被的蒸散^[1,3-5]。SW 模型为双源模型,同时考虑冠层蒸腾和土壤蒸发,对稀疏植被模拟效果较好^[6-11]。蒸散模拟涉及若干阻力因子,其中冠层阻力对蒸散影响最大^[12]。冠层阻力可由叶片气孔阻力上推得到^[13-14]。Jarvis^[15]指出影响气孔阻力的环境因子主要有太阳辐射、空气湿度、气温、土壤水分等,并提出了估算气孔阻力的公式。学者们在此基础上提出各种计算气孔阻力环境胁迫函数的参数化方案,如 Stewart^[16]、Noilhan 等^[17]、孙景生^[18]等。Jarvis 公式被广泛用于各种植被的蒸散模拟中。由于公式参数较多,且这些参数表达的准确性直接影响到模型的精度,在参数难以获得的地区,有必要简化计算方法,在保证计算精度的前提下将所需参数降至最少。由 Kelliher 等^[19]提出、Leuning 等^[20]改进的冠层导度(冠层阻力的倒数)公式忽略了土壤水分的影响,所需参数只有 Jarvis 公式的一半,计算更加方便。该公式用于 PM 模型,模拟各种植被的蒸散效果较好^[20-21]。

玉米是我国三大粮食作物之一,我国的玉米种植面积和总产量位居世界第二。玉米生长耗水较多,在降水季节性变化明显的北方地区,水分供给成为

影响玉米产量的主要因素,研究玉米田蒸散有重要意义。玉米是一种高秆稀植作物,土壤蒸发占总蒸散的比重较大^[22-23],不容忽略。近年来学者们使用了多种方法对玉米的蒸散进行了模拟,吕厚荃等^[22]对比了 Priestley-Taylor 模型和 PM 模型对玉米的模拟结果,发现使用 Priestley-Taylor 模型可取得较好效果,但在干旱条件下误差较大。贾红等^[7]使用 SW 模型和 PM 模型模拟了玉米田蒸散,显示 SW 模型模拟精度更高,但是 SW 中的冠层阻力参数计算复杂,不便应用。

本文采用 SW 模型模拟玉米地蒸散,以涡度相关法测定的蒸散为参照,对采用不同冠层阻力公式的 SW 模型模拟蒸散的效果进行比较,并分析了 SW 模型对各阻力参数的敏感性,以期简化蒸散计算,为资料稀缺地区的蒸散模拟提供较为便捷的途径。

1 Shuttleworth-Wallace 模型介绍

Shuttleworth-Wallace(SW)模型同时考虑植被蒸腾和土壤蒸发,并将植被和土壤视为两个独立却又相互作用的水汽源。地表潜热通量(LE)由下式计算:

$$LE = C_c LE_c + C_s LE_s \quad (1)$$

式中: LE_c 是冠层潜热通量($W \cdot m^{-2}$), LE_s 是土壤潜热通量($W \cdot m^{-2}$)。由下式计算:

$$LE_c = \frac{\Delta(R_n - G) + \frac{\rho C_p D - \Delta r_a^c (R_{ns} - G)}{(r_a^a + r_a^c)}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s^c}{r_a^a + r_s^c}\right)} \quad (2)$$

$$LE_s = \frac{\Delta(R_n - G) + \frac{\rho C_p D - \Delta r_a^s (R_n - R_{ns})}{(r_a^a + r_a^s)}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s^s}{r_a^a + r_a^s}\right)} \quad (3)$$

式中: Δ 为饱和水汽压对温度曲线的斜率($kPa \cdot K^{-1}$),

R_n 为净辐射($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), R_{ns} 和 R_n 分别表示土壤和冠层净辐射($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), G 为土壤热通量($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), ρ 为空气密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), C_p 为空气定压比热($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), D 为饱和水汽压差(kPa), γ 为干湿表常数($\text{kPa}\cdot\text{K}^{-1}$), r_a^a 为冠层到参考高度的空气动力学阻力($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$), r_a^c 为冠层表面边界层阻力($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$), r_a^s 为土壤表面到冠层高度的空气动力学阻力($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$), r_s^c 为冠层阻力($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$), r_s^s 为土壤表面阻力($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$).

C_c 和 C_s 分别为作物冠层和土壤表面的系数, 其计算如下:

$$C_c = \frac{1}{1 + \frac{R_c R_a}{R_s (R_c + R_a)}} \quad (4)$$

$$C_s = \frac{1}{1 + \frac{R_s R_a}{R_c (R_s + R_a)}} \quad (5)$$

式中, R_a 、 R_c 、 R_s 计算式分别为:

$$R_a = (\Delta + \gamma) r_a^a \quad (6)$$

$$R_c = (\Delta + \gamma) r_a^c + \gamma r_s^c \quad (7)$$

$$R_s = (\Delta + \gamma) r_a^s + \gamma r_s^s \quad (8)$$

冠层导度(冠层阻力的倒数)可由叶片气孔导度(气孔阻力的倒数)与叶面积密度沿铅直方向积分得到^[13-14], 本文采用下列简化模式计算冠层阻力(r_s^c)^[2,17]:

$$r_s^c = \frac{r_{ST}}{\text{LAI}_e} \quad (9)$$

式中: LAI_e 为冠层有效叶面积指数, 由实际叶面积指数计算^[24]. 叶片气孔阻力(r_{ST})受周围环境因素影响, 可由 Jarvis 公式^[15]计算:

$$r_{ST} = r_{\min} \times (F_1 \times F_2 \times F_3 \times F_4)^{-1} \quad (10)$$

式中: F_1 、 F_2 、 F_3 和 F_4 分别代表太阳辐射、土壤水分、空气湿度和温度的胁迫函数, 具体计算采用 Jarvis^[15]和 Noilhan 等^[17]提出的参数化模型:

$$F_1 = \frac{\frac{r_{\min}}{r_{\max}} + f}{1 + f} \quad (11)$$

$$f = 0.55 \frac{Q_t}{Q_{\text{cri}}} \frac{2}{\text{LAI}} \quad (12)$$

$$F_2 = \frac{\theta - \theta_w}{\theta_f - \theta_w} \quad (13)$$

$$F_3 = 1 - \beta(e_s - e_a) \quad (14)$$

$$F_4 = 1 - 0.0016(T_0 - T_a)^2 \quad (15)$$

式中: r_{\min} 、 r_{\max} 表示最小和最大气孔阻力, 此处夏玉米取值为 $120 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $2400 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$ ^[25]; Q_t 是到达冠层

顶端太阳辐射($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$); Q_{cri} 为冠层辐射临界值, 取 $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ^[25-26]; θ 为根层土壤含水量, θ_f 为田间持水量, θ_w 为凋萎含水量($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$); e_s 、 e_a 分别表示饱和水汽压和实际水汽压(kPa); β 为系数, 取值 0.061 kPa^{-1} ; T_a 为气温(); T_0 为参考叶温, 玉米取 25 ^[25-27].

鉴于 Jarvis 公式计算气孔阻力需要参数较多, 不便应用, 一些学者提出了不同的计算方法. Kelliher 等^[19]使用冠层顶部的最大气孔导度和叶面积指数来描绘冠层导度(冠层阻力的倒数):

$$G_c = \frac{g_{sx}}{k_Q} \ln \left[\frac{Q_h + Q_{50}}{Q_h \exp(-k_Q L) + Q_{50}} \right] \quad (16)$$

Leuning 等^[20]在其基础上进行修改, 引入最大气孔导度一半时的水分亏缺参数, 提出了以下公式:

$$G_c = \frac{g_{sx}}{k_Q} \ln \left[\frac{Q_h + Q_{50}}{Q_h \exp(-k_Q L) + Q_{50}} \right] \left[\frac{1}{1 + D_a/D_{50}} \right] \quad (17)$$

$$G_c = \frac{g_{sx}}{k_Q} \ln \left[\frac{Q_h + Q_{50}}{Q_h \exp(-k_Q L) + Q_{50}} \right] \left[\frac{1}{1 + D/D_{50}} \right] \quad (18)$$

式中: g_{sx} 为最大气孔导度($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$); L 为叶面积指数; Q_h 为冠层顶部的可见光通量密度(约为入射太阳辐射的一半)($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), $Q_h = 0.8(R_n - G)$; k_Q 是短波辐射的消光系数, 取 0.6 ^[20]; Q_{50} 为最大气孔导度一半时的可见光通量密度($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), 取 $30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ^[20]; D 为饱和水汽压差(kPa); D_{50} 为最大气孔导度一半时的水分亏缺(kPa), 取 0.7 kPa ^[20-21]. 本文将采用 Jarvis 公式的 SW 模型记为 SW1 模型, 采用 Kelleher-Leuning 公式的 SW 模型记为 SW2 模型. 其他阻力参数 r_a^a 、 r_a^c 、 r_a^s 采用 Shuttleworth 提出的公式计算^[2,6], r_s^s 参考丛振涛等^[26]的计算方法.

2 研究地点和方法

2.1 研究地点

观测在中国科学院禹城农业综合实验站(36.83N, 116.57E, 23.0 m)进行. 该试验站位于山东省禹城市, 地处黄河中下游, 属暖温带半湿润季风气候区, 近 30 年年平均温度为 13.2 , 年均降雨量为 600 mm , 年辐射总量 $5225 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, 雨热同期, 利于农业生产. 当地种植制度为冬小麦/夏玉米轮作, 一年两季. 该站的自然条件及作物种植制度在华北平原具有典型性.

2.2 田间观测方法

在大片玉米地的中心架设涡度相关系统和小气候梯度观测系统. 涡度相关系统包括 H_2O 和 CO_2 红外气体分析仪(LI-7500, Li-Cor, USA)和三维超声风

速仪(CSAT3, Campbell Sci., USA), 观测高度为 2.5 m。上述观测数据由数据采集器(CR5000, Campbell Sci., USA)实时采集并存储, 采样频率为 10 Hz, 每 30 min 输出一组平均值。

小气候观测系统包括两层温湿度传感器(HMP-45C, Vaisala, Finland)和三杯风速计(AR-100, Vector Instruments, UK), 安装高度初期为 2.2 m 和 3.4 m, 玉米拔节后提高到 3.4 m 和 4.6 m。长短波辐射数据由辐射仪(CNR1, Kipp & Zonen, Netherlands)监测, 土壤热通量由土壤热流板(HFT-3, Campbell Sci., USA)测得, 其安装在土表以下 2 cm 处。采用 TDR 探针(CS615-L, CS., USA)测量不同深度的土壤含水量(10 cm 和 30 cm), 使用雨量筒 52203(RM Young, USA)测定降水量。以上仪器都与数据采集器 CR23x, Campbell Sci., USA)连接, 每 30 min 输出一组平均值。对所有仪器都作严格标定, 确保数据的可靠性。

本试验的观测时间为 2003 年与 2004 年的夏玉米生长季(7—9 月)。涡度相关通量观测和小气候梯度观测贯穿夏玉米生长季的始终。同期观测夏玉米的生育期、株高、叶面积和生物量等。每周测定一次, 每次田间随机选取 3 点, 每点连续 3 株。叶面积由叶面积仪(Li-3100, Li-cor Inc., USA)测定。

对涡度相关系统得到的 30 min 显热、潜热通量数据进行 WPL 校正和两次坐标轴旋转。剔除有雨、露时采集的通量数据及其他超出正常范围($\pm 3\sigma$)的数据。对于缺失数据根据缺失时长采用不同方法进行插补。2 h 以内(含)的缺失采用线性内插法, 2 h 以上的缺失采用平均日变化法(MDV)^[28-30]。

2.3 模型验证和敏感性分析

本文以涡度相关系统每 30 min 测定的蒸散量(ET)作为参照, 分别将修改前后的 SW 模型计算出的 ET 与其进行比较, 用以检验模型的模拟效果。在评价模型的模拟精度时除了使用斜率(slope)、截距(intercept)、相关系数(r)、均方根误差(RMSE)等, 还引入了标准均方根误差(NRMSE)和一致性指数(IA)等指标评价模拟效果^[31]。

$$\text{NRMSE} = \frac{\text{RMSE}}{X_{\text{obs}}} \quad (19)$$

$$\text{IA} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|X_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (20)$$

式中: X_i 为模拟值, O_i 为测量值, \bar{O} 为平均实测值。标准均方根误差(NRMSE), 用于说明数据的离散程

度, 无量纲, NRMSE 越接近 0 说明数据越集中, 模型的模拟效果越好。一致性指数 IA 是均方误差与可能误差的比率, 取值在 0~1 之间, 1 代表模拟值与实测值完全一致, 0 表示完全不一致。

本文通过改变阻力项的大小(增加或减少 10%)比较改变前后模拟 ET 的相对变化率, 来估算阻力项对模型的敏感性^[12]。

3 结果分析

3.1 模型验证

模拟结果表明: SW1 和 SW2 模型模拟的每 30 min 玉米地 ET 均与实测 ET 吻合较好(图 1、表 1)。从图 1 可以看出, SW2 模型在 7、8 月份拟合线更接近 1:1 线, SW1 模型在 9 月份拟合线更接近 1:1 线。8 月份 SW1 和 SW2 模型模拟蒸散效果都很好, 但后者拟合直线更接近 1:1 线。

从表 1 可以看出, 两种模型模拟 ET 与实际 ET 拟合曲线的斜率范围都在 0.858 与 1.107 之间, 相关系数都达到 0.85 以上($P < 0.01$), 均方根误差在 $0.07 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下, 一致性指数均超过 0.92, 标准均方根误差不超过 0.43。从各月看, 7 月份 SW1 模型蒸散的模拟值与实测值的相关系数比 SW2 模型略大, 一致性指数也比 SW2 模型更接近 1, 均方根误差略大。8 月两种模型模拟效果接近, 相关系数、均方根误差以及一致性指数均差别不大。9 月份, SW2 模型的相关系数和一致性指数更大, 均方根误差比 SW1 模型更小(表 1)。可以看出 SW1 和 SW2 模型能够较好地模拟玉米地蒸散。

本文选取叶面积指数大于 3、观测数据较为连续的 2003 年 8 月上中旬, 比较 SW1 与 SW2 模型模拟的蒸散与实测蒸散的日变化。发现在此期间 SW1 和 SW2 模型均能较好地反映玉米地的蒸散日变化趋势, SW2 的模拟值比 SW1 的模拟值略高, 更接近实测值(图 2)。

3.2 模型敏感性分析

SW1 和 SW2 模型对各阻力参数的敏感性分析结果(表 2)表明: 7—9 月, 土壤表面阻力(r_s^s)、冠层阻力(r_s^c)、冠层表面边界层阻力(r_a^c)、土壤表面至冠层高度的空气动力学阻力(r_a^s)和冠层高度至参考高度的空气动力学阻力(r_a^a)每增加或减少 10%, SW1 和 SW2 模拟的 ET 分别减少或增加 0.89%和 0.88%、4.19%和 4.16%、0.34%和 0.36%、0.47%和 0.48%、0.00%和 0.00%, SW1 模型和 SW2 模型的变化量相当。 r_s^c 对 ET 影响最大, r_s^s 次之, r_a^s 和 r_a^c 对 ET 影响

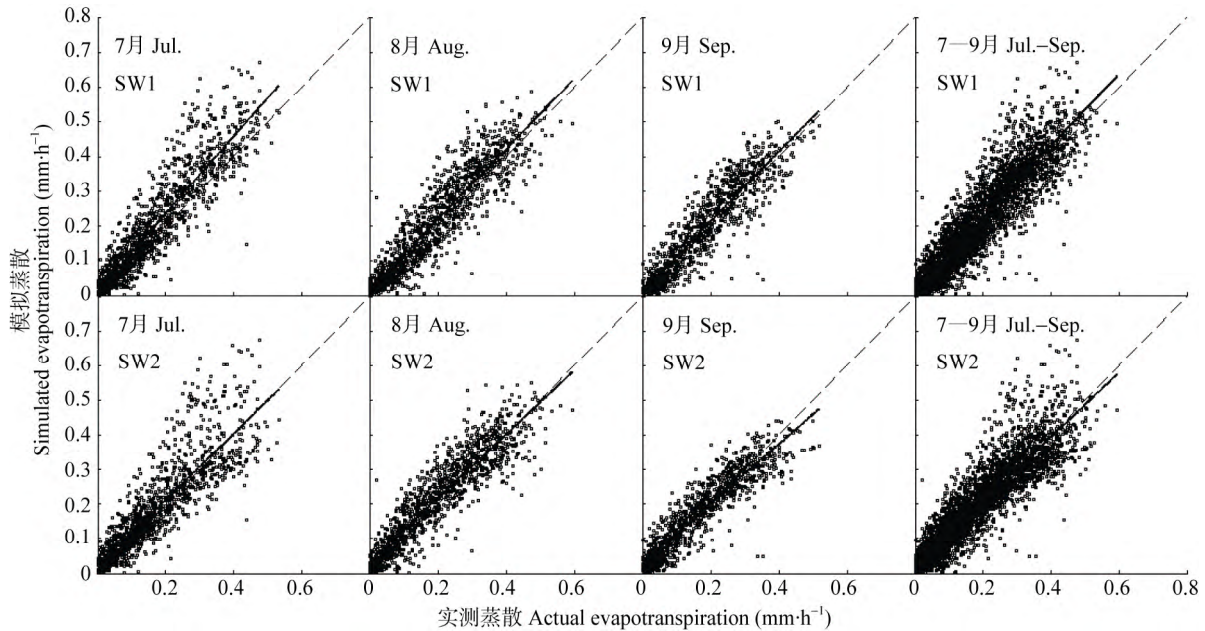


图 1 SW1 和 SW2 模型模拟的每半小时蒸散量与实测值比较(上行: 2003 年; 下行: 2004 年)

Fig. 1 Comparison of simulated evapotranspiration (ET) for 30 min by different models (SW1 and SW2) with measured ET in 2003 (upper) and 2004 (lower)

SW 指 Shuttleworth-Wallace 模型; SW1 模型采用 Jarvis 冠层阻力公式, SW2 模型采用 Kelliher-Leuning 冠层阻力公式, 下同。蒸散模拟值与实测值线性拟合公式的参数及显著性检验见表 1。虚线为 1:1 线。SW is Shuttleworth-Wallace model. SW1 and SW2 are SW models with Jarvis approach and Kelliher-Leuning approach, respectively, to calculate the canopy resistance. The same below. Table 1 shows the parameters of the linear regressions equations between simulated and measured evapotranspiration, and the significance test. The dashed line was 1:1 line.

表 1 SW1 和 SW2 模型模拟的玉米地蒸散量精度验证(2003 年和 2004 年)

Table 1 Accuracy of simulated evapotranspiration by SW1 and SW2 models of summer maize field in 2003 and 2004

月份 Month	模型 Model	截距 Intercept (mm·h ⁻¹)	斜率 Slope	相关系数 Relative coefficient (R)	均方根误差 RMSE (mm·h ⁻¹)	一致性指数 Index of agreement (IA)	标准均方根误差 NRMSE
7	SW1	0.014	1.107	0.901**	0.070	0.933	0.422
	SW2	0.020	0.956	0.873**	0.067	0.928	0.409
8	SW1	0.015	1.014	0.911**	0.060	0.951	0.306
	SW2	0.033	0.919	0.916**	0.056	0.952	0.288
9	SW1	0.011	1.001	0.902**	0.054	0.952	0.309
	SW2	0.029	0.858	0.916**	0.048	0.955	0.280
7—9	SW1	0.014	1.040	0.913**	0.062	0.945	0.349
	SW2	0.026	0.920	0.898**	0.058	0.945	0.330

截距和斜率分别为图 1 中模拟值(y)与实测值(x)直线拟合方程(y=a+bx)的系数 a 和 b; “**”表示通过 P<0.01 的显著性检验。Intercept and slope are a and b of the equation of linear regression between simulated ET (y) and measured ET (x): y=a+bx in the figure 1. “**” means pass the significance test at P < 0.01 level.

较小, r_a^a 对 ET 影响接近于 0, 可忽略不计。模型估算的 ET 对各阻力参数的敏感性随作物生长而发生变化。ET 对 r_s^c 的敏感性 8 月、9 月大于 7 月, 对 r_s^s 、 r_a^s 和 r_a^c 的敏感性则是 7 月大于 8 月、9 月(表 2)。

SW1 模型中, 7—9 月最大气孔阻力(r_{max})、最小气孔阻力(r_{min})、冠层临界辐射(Q_{cri})、田间持水量(θ_f)、凋萎含水量(θ_w)、参考叶温(T_0)和有效叶面积指数(LAI_e)每变化 10%, 模拟的 ET 分别变化 0.16%、4.03%、1.42%、6.24%、0.58%、0.79%和 4.18%, 其

中 θ_f 对蒸散影响最大, 其次是 r_{min} 和 LAI_e, r_{max} 对蒸散影响最小(表 2)。ET 对上述各参数的敏感性均是 8 月、9 月大于 7 月(表 2)。

SW2 模型中, 7—9 月最大气孔导度(g_{sx})、消光系数(k_Q)、最大气孔导度一半时的可见光通量密度(Q_{50})和最大气孔导度一半时的水分亏缺(D_{50})每变化 10%, ET 分别变化 4.14%、1.24%、1.19%和 2.51%, 其中 g_{sx} 对 ET 影响最大, D_{50} 次之, k_Q 和 Q_{50} 影响较小。ET 对以上各参数的敏感性都是 8 月、9 月大于 7 月(表 2)。

<http://www.ecoagri.ac.cn>

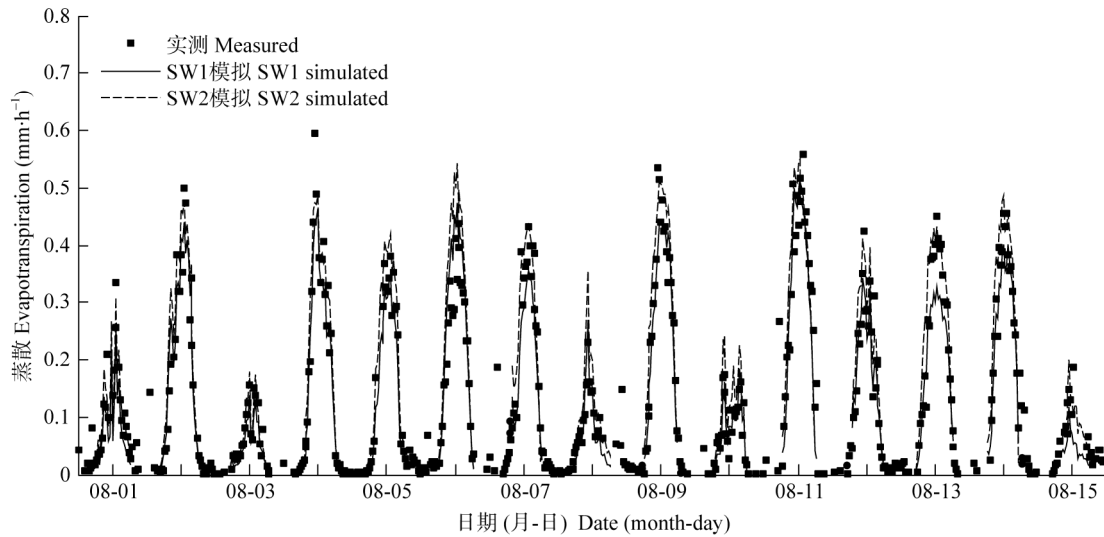


图 2 SW1 和 SW2 模型模拟的每半小时蒸散量(ET)与实测值比较(2003 年)

Fig. 2 Comparison of simulated evapotranspiration (ET) for 30 min by using SW1 and SW2 models and measured evapotranspiration in a maize field in 2003

表 2 SW1 与 SW2 模型模拟玉米地蒸散对参数变化的敏感性分析(2003 年、2004 年)

Table 2 Sensitivities of simulated evapotranspiration (ET) by using SW1 and SW2 models to the changes of parameters in a maize field in 2003 and 2004 %

参数 Parameter	7 月 July		8 月 August		9 月 September		7—9 月 From July to September	
	SW1	SW2	SW1	SW2	SW1	SW2	SW1	SW2
r_s^s	1.32	1.49	0.56	0.48	0.72	0.67	0.89	0.88
r_s^c	1.96	1.83	5.02	4.87	6.09	6.00	4.19	4.16
r_a^c	0.62	0.74	0.16	0.14	0.17	0.17	0.34	0.36
r_a^s	0.65	0.78	0.28	0.22	0.47	0.44	0.47	0.48
r_a^a	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
r_{max}	0.04		0.22		0.24		0.16	
r_{min}	1.92		4.80		5.85		4.03	
Q_{cri}	0.42		1.88		2.16		1.42	
θ_f	3.71		6.99		8.62		6.24	
θ_w	0.24		0.59		1.01		0.58	
T_0	0.79		1.22		0.63		0.79	
LAI_e	1.96		5.01		6.06		4.18	
g_{sx}		1.82		4.86		5.97		4.14
k_Q		0.20		1.76		1.80		1.24
Q_{50}		0.41		1.45		1.79		1.19
D_{50}		1.05		2.90		3.72		2.51

表中数值为模型参数每变化±10%，模拟所得 ET 变化的平均百分比(%)。 r_s^s 为土壤表面阻力， r_s^c 为冠层阻力， r_a^c 为冠层表面边界层阻力， r_a^s 和 r_a^a 分别为土壤表面至冠层高度和冠层高度至参考高度的空气动力学阻力； r_{max} 和 r_{min} 分别为最大和最小气孔阻力， Q_{cri} 为冠层辐射临界值， θ_f 、 θ_w 分别为根层田间持水量以及凋萎含水量， T_0 为参考叶温， LAI_e 为有效叶面积指数； g_{sx} 为最大气孔导度， k_Q 是短波辐射的消光系数， Q_{50} 为最大气孔导度一半时的可见光通量密度， D_{50} 为最大气孔导度一半时的水分亏缺。Values in the table are the average changing percentages of simulated ET to the ±10% change in models parameters. r_s^s is soil surface resistance, r_s^c is bulk resistances of canopy stomatal, r_a^c is bulk resistances of boundary layer, r_a^s and r_a^a are aerodynamic resistances from soil to canopy and from canopy to reference height respectively. r_{max} and r_{min} are maximum and minimum stomatal resistance of individual leaf respectively, Q_{cri} is critical surface solar radiation. θ_f is saturated soil water content, θ_w is residual soil moisture content. T_0 is reference temperature for maize photosynthesis, LAI_e is the effective LAI. g_{sx} is the maximum stomatal conductance of leaves at the top of the canopy, k_Q is the extinction coefficient for solar radiation, Q_{50} is the visible radiation flux when stomatal conductance is half its maximum value, D_{50} is the humidity deficit at which stomatal conductance is half its maximum value.

3.3 模型结果分析

很多研究发现，土壤蒸发占总蒸散的比重在作物生长前期较大，在作物生长中后期较小^[32-35]。本

文通过模拟也得到了类似的结果：玉米田土壤蒸发占总蒸散的比重随叶面积增加迅速下降(图 3)。从图中可以看出，7 月初，土壤蒸发(E)作用大于冠层蒸腾

(T), 蒸发占总蒸散(E/ET)的比重(E/ET)较大, 这主要是由于玉米生长早期, 叶面积指数(LAI)较小, 裸露土壤接受净辐射较大, 能量主要用于土壤蒸发。此后随玉米的生长, LAI增加, T 增长显著, E/ET 下降趋势明显。玉米拔节期(7月20日至30日), LAI增长

速度加快, E/ET 下降速率变缓, 开花乳熟期(8月1日至9月6日), E/ET 和 T 达到峰值, 此阶段玉米叶片处于最旺盛期, 冠层完全郁闭, 冠层蒸腾作用最盛。之后 LAI 逐渐下降, E/ET 与 T 缓慢减少, E/ET 稳定在 0.2 左右。

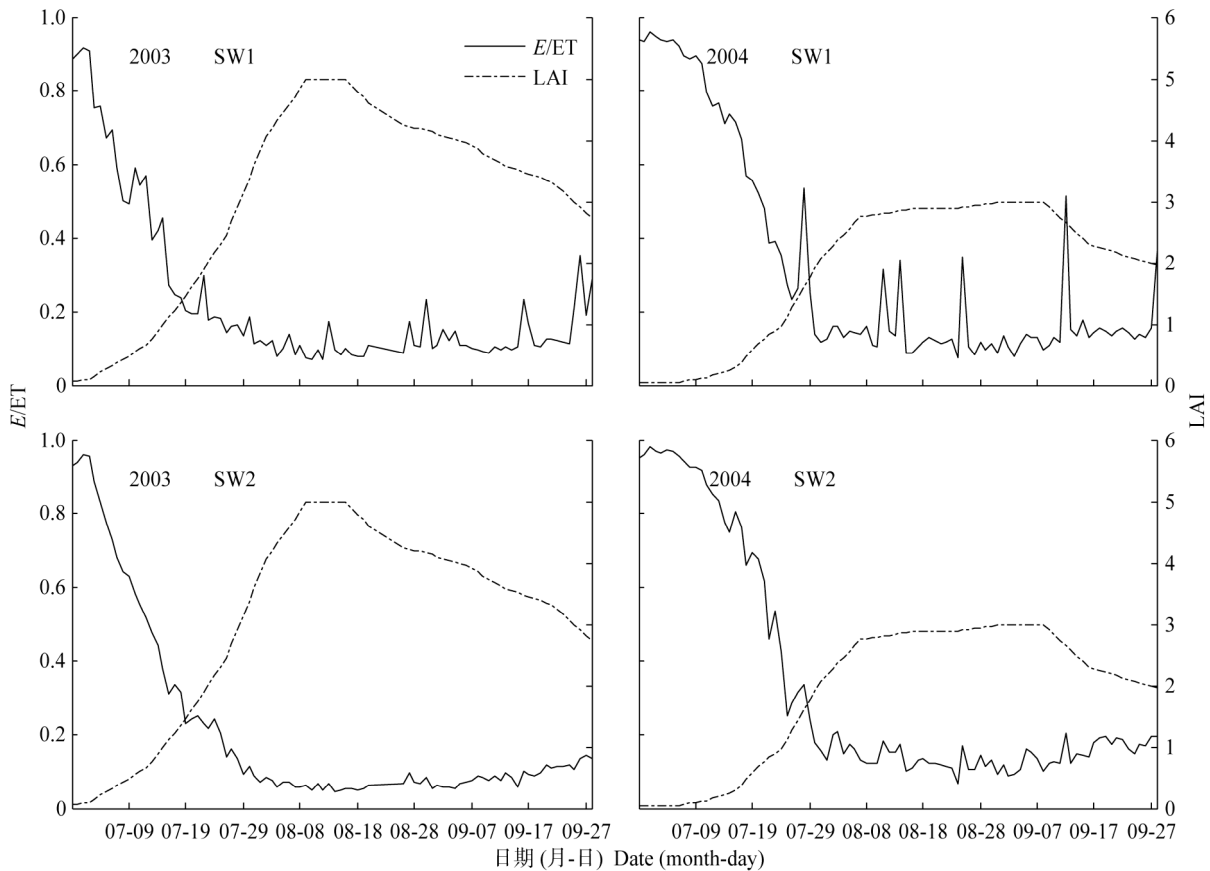


图 3 SW1 和 SW2 模型模拟的玉米田蒸发占总蒸散量比重(E/ET)与实测 LAI 的季节变化

Fig. 3 Seasonal variations of measured LAI and proportions of transpiration in evapotranspiration (E/ET) simulated by SW1 and SW2 models in a maize field

4 讨论

冠层阻力是蒸散模型中的一个重要参数。群体冠层阻力无法直接测定, 一般由实测通量数据反推, 也可用模型计算。较常见的是 Jarvis^[15]模型(公式 9~15), 该模型同时考虑了太阳辐射、土壤供水、空气湿度、温度以及叶面积指数的影响。后来一些学者陆续对冠层阻力模型进行了改进, 如 Stewart^[16]、Noilhan 等^[17]、孙景生^[18]等, 但是这些模型涉及参数较多, 限制了其在资料稀缺地区的应用。由 Kelliher 等^[19]提出、Leuning 等^[20]改进的冠层阻力计算公式(公式 17)考虑了环境因素的影响, 只有 4 个参数, 计算比 Jarvis 方法更加方便。Zhang 等^[21]、Leuning 等^[20]将公式 17 用于 PM 模型, 并在包括农田和森林生态系统在内的 15 个站点进行验证, 取得了较好的效果。

其中玉米田、大豆田蒸散的模拟值与实测值相关系数达 0.90。本研究将 Kelliher-Leuning 公式(公式 17)用于 SW 模型, 模拟玉米地蒸散, 也取得了较好的效果, 平均相关系数为 0.90, 一致性指数达 0.95。总体看来, 采用 Kelliher-Leuning 公式的 SW2 模型与采用 Jarvis 公式的 SW1 模型都能较好地模拟玉米田蒸散, 但是 SW2 的计算相对简单, 更便于模型的应用。

在玉米田的研究结果表明, r_s^c 对 SW 模型估算的 ET 影响最大, 这与刘绍民等^[12]在冬小麦田的研究结果一致。进一步研究表明, 在影响 r_s^c 计算的参数中, SW1 模型模拟的 ET 对 θ_f 的敏感性最大, SW2 模型模拟的 ET 对 r_{\min} 或 $g_{sx}(r_{\min}$ 的倒数)的敏感性最大, 与 Leuning 等^[20]的研究结果相同。田间持水量是土壤能稳定保持的最大含水量, 是供植物蒸腾和土

<http://www.ecoagri.ac.cn>

壤蒸发的水量上限。植物通过叶片蒸腾水分, 叶面积以及有效叶面积代表蒸腾表面的大小。气孔控制叶/气界面的水汽交换, 植物通过气孔的开度调节蒸腾速率的大小。气孔阻力是影响蒸腾作用的主要生理原因^[36], 最小气孔阻力(或最大气孔导度)成为影响蒸腾速率的关键要素。上述这些参数的变化必然对蒸散产生很大影响。SW2 模型采用 Kelliher-Leuning 公式计算冠层阻力, 在一定程度上简化了冠层阻力的计算, 更便于区域应用。

5 结论

综上所述, 本文得到以下结论:

SW1 和 SW2 模型模拟的玉米地蒸散量均与实测值吻合较好, 其相关性均达 0.01 显著水平, 一致性指数都超过 0.92, 两个模型模拟蒸散都取得了较好的效果。SW2 模型采用 Kelliher-Leuning 公式计算冠层阻力, 在一定程度上简化了冠层阻力的计算, 更易于农田蒸散模拟估算。

SW1、SW2 模型均对 r_s^c 最敏感, r_s^s 次之。模型估算的 ET 对 r_s^c 的敏感性 8 月、9 月大于 7 月, 对 r_s^s 的敏感性则是 7 月大于 8 月、9 月。在计算冠层阻力的各个参数中, SW1 模型对 θ_f 最敏感, 其次是 r_{\min} 和 LAI_{eo}。SW2 模型对 g_{sx} 的敏感性最大。模型估算的 ET 对这些参数的敏感性均是 8 月、9 月大于 7 月。

参考文献

- [1] Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass[J]. Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1948, 193(1032): 120–145
- [2] 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
- [3] Stannard D I. Comparison of Penman-Monteith, Shuttleworth-Wallace, and modified Priestley-Taylor evapotranspiration models for wildland vegetation in semiarid rangeland[J]. Water Resources Research, 1993, 29(5): 1379–1392
- [4] Kustas W P, Stannard D I, Allwine K J. Variability in surface energy flux partitioning during Washita'92: Resulting effects on Penman-Monteith and Priestley-Taylor parameters[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1996, 82(1/4): 171–193
- [5] 吕厚荃, 于贵瑞. 几种实际蒸散计算方法在土壤水分模拟中的应用[J]. 资源科学, 2001, 23(6): 85–90
Lü H Q, Yu G R. Application of some actual evapotranspiration models in simulation of soil moisture[J]. Resources Science, 2001, 23(6): 85–90
- [6] 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
- [7] 贾红, 胡继超, 张佳宝, 等. 应用 Shuttleworth-Wallace 模型对夏玉米农田蒸散的估计[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(4): 77–80
Jia H, Hu J C, Zhang J B, et al. Estimation of evapotranspiration during the maize growing season using the Shuttleworth-Wallace model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(4): 77–80
- [8] 刘雅妮, 武建军, 夏虹, 等. 地表蒸散遥感反演双层模型的研究方法综述[J]. 干旱区地理, 2005, 28(1): 65–71
Liu Y N, Wu J J, Xia H, et al. Summary of two-layer models on estimating evapotranspiration using quantitative parameters derived from remote sensing[J]. Arid Land Geography, 2005, 28(1): 65–71
- [9] 曹启桓, 刘远, 周买春, 等. 基于 AVHRR NDVI 的 Shuttleworth-Wallace 模型在韩江流域的应用[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2013, 52(2): 121–128
Cao Q H, Liu Y, Zhou M C, et al. Application of Shuttleworth-Wallace model in Hanjiang River Basin using AVHRR NDVI data[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2013, 52(2): 121–128
- [10] 朱仲元, 朝伦巴根, 王志强, 等. 基于 Shuttleworth-Wallace 双源模型的天然杨树蒸散量日变化研究[J]. 水利学报, 2007, 38(5): 582–590
Zhu Z Y, Chao L B G, Wang Z Q, et al. Study on diurnal variation of *Populus* evapotranspiration based on Shuttleworth-Wallace model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(5): 582–590
- [11] Zhou M C, Ishidaira H, Hapuarachchi H P, 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
- [12] 刘绍民, 孙中平, 李小文, 等. 蒸散量测定与估算方法的对比研究[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 161–167
Liu S M, Sun Z P, Li X W, et al. A comparative study on models for estimating evapotranspiration[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2): 161–167
- [13] Raupach M R, Finnigan J J. 'Single-layer models of evaporation from plant canopies are incorrect but useful, whereas multilayer models are correct but useless': Discuss[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1988, 15(6): 705–716
- [14] Raupach M R. Vegetation-atmosphere interaction and surface conductance at leaf, canopy and regional scales[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 73(3): 151–179
- [15] 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. Series B, Biological Sciences, 1976, 273(927): 593–610
- [16] Stewart J B. Modelling surface conductance of pine forest[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1988, 43(1): 19–35
- [17] Noilhan J, Planton S. A simple parameterization of land sur-

<http://www.ecoagri.ac.cn>

- face processes for meteorological models[J]. *Monthly Weather Review*, 1989, 117(3): 536–549
- [18] 孙景生. 夏玉米叶片气孔阻力与冠层阻力估算模型的研究[J]. *灌溉排水*, 1996, 15(3): 16–20
Sun J S. Studies on the estimating models of leaf stomatal resistance and canopy resistance for summer corn[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 1996, 15(3): 16–20
- [19] 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
- [20] 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): 1–17
- [21] Zhang Y Q, Leuning R, Chiew F H S, et al. Decadal trends in evaporation from global energy and water balances[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2012, 13(1): 379–391
- [22] 吕厚荃, 钱拴, 杨霏云, 等. 华北地区玉米田实际蒸散量的计算[J]. *应用气象学报*, 2003, 14(6): 722–728
Lü H Q, Qian S, Yang F Y, et al. Estimation of actual evapotranspiration for maize field in North China[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2003, 14(6): 722–728
- [23] 米娜, 陈鹏狮, 张玉书, 等. 几种蒸散模型在玉米农田蒸散量计算中的应用比较[J]. *资源科学*, 2009, 31(9): 1599–1606
Mi N, Chen P S, Zhang Y S, et al. A comparative study on estimation models for field evapotranspiration[J]. *Resources Science*, 2009, 31(9): 1599–1606
- [24] 李俊, 韩凤明, 同小娟, 等. 麦田蒸散模型的改进及其对阻力参数的敏感性分析[J]. *中国农业气象*, 2014, 35(6): 635–643
Li J, Han F M, Tong X J, et al. Evapotranspiration models for a winter wheat field: The improvements and analyses on their sensitivities to the resistance parameters[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, 35(6): 635–643
- [25] 莫兴国. 土壤-植被-大气系统水分能量传输模拟和验证[J]. *气象学报*, 1998, 56(3): 323–332
Mo X G. Modeling and validating water and energy transfer in soil-vegetation-atmosphere system[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1998, 56(3): 323–332
- [26] 丛振涛, 雷志栋, 杨诗秀. 基于 SPAC 理论的田间腾发量计算模式[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(2): 6–9
Cong Z T, Lei Z D, Yang S X. Evapotranspiration model based on SPAC theory[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(2): 6–9
- [27] 姚德良, 谢正桐, 李家春. 禹城地区陆气相互作用耦合模式和观测研究[J]. *生态学报*, 2000, 20(6): 1076–1082
Yao D L, Xie Z T, Li J C. Land-atmosphere interaction model and observation in Yucheng County[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(6): 1076–1082
- [28] Falge E, Baldocchi D, Olson R, et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1): 43–69
- [29] Falge E, Baldocchi D, Olson R, et al. Gap filling strategies for long term energy flux data sets[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1): 71–77
- [30] 李俊, 于强, 孙晓敏, 等. 华北平原农田生态系统碳交换及其环境调控机制[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36(S1): 210–223
Li J, Yu Q, Sun X M, et al. Carbon dioxide exchange and the mechanism of environmental control in a farmland ecosystem in North China Plain[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 36(S1): 210–223
- [31] Popova Z, Pereira L S. Modelling for maize irrigation scheduling using long term experimental data from Plovdiv region, Bulgaria[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(4): 675–683
- [32] Liu C M, Zhang X Y, Zhang Y Z. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111(2): 109–120
- [33] 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 X B, Kang E S, Zhao W Z, 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
- [34] Hu Z M, Yu G R, Zhou Y L, 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
- [35] Ding R S, Kang S Z, Zhang Y Q, et al. Partitioning evapotranspiration into soil evaporation and transpiration using a modified dual crop coefficient model in irrigated maize field with ground-mulching[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 127: 85–96
- [36] Sheriff D W. Epidermal transpiration and stomatal responses to humidity: Some hypotheses explored[J]. *Plant, Cell & Environment*, 1984, 7(9): 669–677