

基于双作物系数法估算不同水分条件下 温室番茄蒸发蒸腾量

龚雪文^{1,2} 刘浩¹ 孙景生^{1*} 马筱建^{1,2} 王万宁^{1,2} 崔永生^{1,2}

(¹中国农业科学院农田灌溉研究所/农业部作物需水与调控重点开放实验室, 河南新乡 453003; ²中国农业科学院研究生院, 北京 100081)

摘要 2015—2016年在中国农业科学院新乡综合试验基地,以华北地区典型日光温室滴灌番茄为研究对象,分析2种灌溉水平[参考20 cm标准蒸发皿的累积蒸发量(E_p),设置2种灌溉水平(高水: $0.9E_p$; 低水: $0.5E_p$)]下番茄不同生育期土壤蒸发(E)、作物蒸腾(T)、蒸发蒸腾(ET)和土壤蒸发占蒸发蒸腾比值(E/ET)的变化,探讨水分亏缺对作物系数(K_c)的影响以及水分胁迫系数(K_s)在全生育期的动态变化.采用双作物系数法分别估算 E 、 T 和 ET ,并与实测结果进行对比分析.结果表明:2015和2016年全生育期高水处理 E 分别比低水处理高21.5%和20.4%,占总蒸发蒸腾量的24.0%和25.0%, E/ET 在生育初期最大、中期最小;高水处理的 K_c 值在生育初期、发育期、生育中期和生育后期分别为0.45、0.89、1.06和0.93,低水处理下分别为0.45、0.89、0.87和0.41;低水处理的 K_s 值在0.32~1.0,生育初期、发育期、生育中期和生育后期分别为0.98、0.93、0.78和0.39.双作物系数法可较精确地估算不同水分处理的 ET ,其平均绝对误差(MAE)为0.36~0.48 mm·d⁻¹,均方根误差(RMSE)为0.44~0.65 mm·d⁻¹;该方法也可精确地估算 E 和 T ,其MAE分别为0.15~0.19和0.26~0.56 mm·d⁻¹,RMSE分别为0.20~0.24和0.33~0.72 mm·d⁻¹.

关键词 日光温室; 土壤蒸发; 作物蒸腾; 作物系数; 水分胁迫系数

Modeling evapotranspiration of greenhouse tomato under different water conditions based on the dual crop coefficient method. GONG Xue-wen^{1,2}, LIU Hao¹, SUN Jing-sheng^{1*}, MA Xiaojian^{1,2}, WANG Wan-ning^{1,2}, CUI Yong-sheng^{1,2} (¹Ministry of Agriculture Key Laboratory for Crop Water Requirement and Regulation, Institute of Farmland Irrigation Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453003, Henan, China; ²Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China).

Abstract: An experiment was conducted to investigate soil evaporation (E), crop transpiration (T), evapotranspiration (ET) and the ratio of evaporation to evapotranspiration (E/ET) of drip-irrigated tomato, which was planted in a typical solar greenhouse in the North China, under different water conditions [irrigation amount was determined based on accumulated pan evaporation (E_p) of 20 cm pan evaporation, and two treatments were designed with full irrigation ($0.9E_p$) and deficit irrigation ($0.5E_p$)] at different growth stages in 2015 and 2016 at Xinxiang Comprehensive Experimental Station, Chinese Academy of Agricultural Sciences. Effects of deficit irrigation on crop coefficient (K_c) and variation of water stress coefficient (K_s) throughout the growing season were also discussed. E , T and ET of tomato were calculated with a dual crop coefficient approach, and compared with the measured data. Results indicated that E in the full irrigation was 21.5% and 20.4% higher than that in the deficit irrigation in 2015 and 2016, respectively, accounting for 24.0% and 25.0% of ET in the whole growing season. The maximum E/ET was measured in the initial stage of

本文由国家高技术研究发展计划项目(2011AA100502)、国家自然科学基金项目(51009140)和中央级科研院所基本科研业务费专项(中国农业科学院农田灌溉研究所)资助 This work was supported by the National High-Tech Project of China (2011AA100502), the National Natural Science Foundation of China (51009140) and the Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences).

2016-09-23 Received, 2017-01-10 Accepted.

*通讯作者 Corresponding author. E-mail: jshsun623@163.com

tomato, while the minimum obtained in the middle stage. The K_c the full irrigation was 0.45, 0.89, 1.06 and 0.93 in the initial, development, middle, and late stage of tomato, and 0.45, 0.89, 0.87 and 0.41 the deficit irrigation. The K_s the deficit irrigation was 0.98, 0.93, 0.78 and 0.39 in the initial, development, middle, and late stage, respectively. The dual crop coefficient method could accurately estimate ET of greenhouse tomato under different water conditions in 2015 and 2016 seasons with the mean absolute error (MAE) of 0.36–0.48 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$, root mean square error (RMSE) of 0.44–0.65 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$. The method also estimated E and T accurately with MAE of 0.15–0.19 and 0.26–0.56 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$, and with RMSE of 0.20–0.24 and 0.33–0.72 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$, respectively.

Key words: solar greenhouse; soil evaporation; crop transpiration; crop coefficient; water stress coefficient.

总蒸发蒸腾量(ET)分为土壤蒸发(E)和作物蒸腾(T)两部分,温室常规种植条件下土壤蒸发是构成总蒸发蒸腾量不可或缺的一部分且参与水汽平衡^[1].对于温室畦灌作物, E/ET 在40%左右^[2-3].然而, E 和 T 的功能显然不同, T 直接关系到植物的生产力,而 E 并不直接参与产量构成.因此,准确区分 E 和 T 在不同生育期的分配关系,并提高 ET 的估算精度是进一步优化水分利用效率、合理分配灌溉用水的关键.

由于温室作物蒸发蒸腾量的准确监测受到诸多时间和空间条件的制约,建立蒸散发数学模型是解决这一问题的有效方法^[4].目前,比较常用的方法有单源 Penman-Monteith (P-M) 模型^[5]、双源 Shuttle-Wallace (S-W) 模型^[6]和双作物系数法^[7].P-M 模型不能有效区分土壤蒸发和作物蒸腾,而是将两者作为一整体估算总蒸散发量^[5].S-W 模型通过引入冠层表面阻力和土壤表面阻力,可分别计算作物蒸腾和土壤蒸发^[6],但该模型多应用于稀疏植被.此外,由于模型涉及参数较多,一些参数的测量误差也会影响模型的估算精度^[8].双作物系数法是一种估算蒸散发的间接方法,该方法将作物系数(K_c)分为基础作物系数(K_{cb})和土壤蒸发系数(K_e),分别用来计算作物蒸腾量和土壤蒸发量^[7].由于双作物系数法结构简单,只需考虑气象条件和作物类型,所需参数少,因此在不同作物类型^[9-11]和地域^[12-14]得到广泛应用.作物系数法在温室中的应用主要集中在对作物系数的研究方面^[15-17],如 Abedikoupai 等^[17]利用微型蒸渗仪分析了温室黄瓜、番茄和辣椒的 K_c 在生育初期、发育期、生育中期和生育后期的变化规律;Razmi 等^[18]探讨了地中海地区玻璃温室番茄 K_c 的变化,以及水分亏缺对水分胁迫系数 (K_s) 的影响,认为 K_c 在发育期、生育中期和生育后期分别为 0.85、1.0 和 0.77,全生育期 K_s 在 0.53~0.98,灌水时间间隔从 4 d 延迟到 8 d 时, K_s 从 0.88 减小到 0.72;

Qiu 等^[19]针对温室番茄不同种植密度,通过引入植被密度系数(K_d)分析了种植密度对 K_c 的影响.综合以上研究不难发现,多数研究缺乏对土壤蒸发系数的考虑,虽然邱让建等^[20]、石小虎等^[21]基于 SIMDual K_c 模型对温室番茄土壤蒸发进行了相关讨论,但由于试验是在地表覆膜条件下进行的,较难反映常规种植条件下土壤蒸发和作物蒸腾的分配关系.

本文针对华北地区典型日光温室的常规种植模式,探讨了温室番茄在不同生育阶段不同水分对土壤蒸发的影响,并分析了基础作物系数、土壤蒸发系数和水分胁迫系数在整个生育期的变化规律,采用双作物系数法分别估算了土壤蒸发和作物蒸腾,并与实测结果进行了对比分析,旨在为华北地区日光温室番茄最优水管理提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验区概况与试验设计

试验于 2015、2016 年 3—7 月在中国农业科学院新乡综合试验基地(35°9' N, 113°5' E, 海拔 78.7 m)的日光温室中进行.试验区位于河南省新乡县七里营镇,属暖温带大陆性季风气候,多年平均降雨量 548 mm,蒸发量 1908 mm,平均气温 14.5 °C,日照时数 2398 h,无霜期 200 d. 试验所用日光温室占地面积 510 m^2 (长 60 m,宽 8.5 m),东西走向,坐北朝南,覆盖无滴聚乙烯薄膜,室内无加热设施.试验区土壤为壤土类,0~100 cm 土壤层平均容重为 1.49 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$,田间持水率为 0.32 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$,凋萎系数为 0.09 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$.

番茄供试品种为“金顶新星”,属无限生长型品种.为确保番茄产量和品质,每株留 4 穗果后进行打顶处理.分别于 2015 年 3 月 12 日和 2016 年 3 月 9 日移栽,采用宽窄行种植模式,宽行 65 cm,窄行 45 cm,所有处理的株距均为 33 cm,种植密度为 5.7 株 $\cdot \text{m}^{-2}$.采用滴灌供水方式(滴头间距为 33 cm,滴

头流量为 $1.1 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$), 以 20 cm 标准蒸发皿作为灌水依据, 当累计蒸发量 (E_p) 达到 $(20 \pm 2) \text{ mm}$ 时进行灌水. 参考刘浩等^[22-23] 对温室滴灌番茄灌溉制度的多年研究成果, 本文分别将灌水量为 $0.9E_p$ 和 $0.5E_p$ 作为高水和低水处理 (0.9 和 0.5 为蒸发皿系数). 为确保幼苗成活并加强其长势, 移栽后以滴灌方式补充灌水 20 mm , 发育期之前不再灌水. 2015 和 2016 年高水处理全生育期总灌水量分别为 284.4 和 280.7 mm , 低水处理总灌水量分别为 175.8 和 173.2 mm . 试验中, 番茄各生育期的时间段分别为: 生育初期 (2015 年 3 月 10 日—4 月 15 日、2016 年 3 月 9 日—4 月 10 日)、发育期 (2015 年 4 月 16 日—5 月 15 日、2016 年 4 月 11 日—5 月 10 日)、生育中期 (2015 年 5 月 16 日—6 月 15 日、2016 年 5 月 11 日—6 月 10 日) 和生育后期 (2015 年 6 月 16 日—7 月 15 日、2016 年 6 月 11 日—7 月 10 日).

1.2 测定项目与方法

1.2.1 气象因子和冠层水面蒸发

在温室中部 2 m 高度位置安装一套全自动气象站, 监测太阳辐射、净辐射、相对湿度、空气温度、风速和土壤热通量. 数据每隔 10 s 记录一次, 30 min 计算一次平均值储存于 CR1000 数据采集器中, 2015 年 3 月 1 日—7 月 15 日和 2016 年 3 月 1 日—7 月 10 日设置为连续监测状态. 2015 和 2016 年试验期间温室内部气象变化见

图 1. 采用 20 cm 标准蒸发皿 (ADM7) 测定冠层上方 30 cm 处的水面蒸发量, 用精度为 0.1 mm 的雨量筒于每日 8:00 测量前一日的水面蒸发量, 每次测量之后添加 20 mm 的水量, 以确保水质.

1.2.2 土壤蒸发

采用微型蒸渗仪分别测量高水和低水处理的土壤蒸发量, 分别于 2015 年 3 月 12 日—7 月 15 日和 2016 年 3 月 10 日—7 月 10 日在番茄植株行间和行间布置 2 套微型蒸渗仪, 每个处理设置 3 个重复, 取平均值作为实际土壤蒸发量. 微型蒸渗仪由内筒和外筒两部分组成, 材质为镀锌铁皮, 内、外筒的高度一致, 为 15 cm , 内筒和外筒的直径分别为 10 和 12 cm . 为方便测量, 预先将外筒埋置于土壤内并保持上边缘与地表齐平, 取土样时将内筒缓慢压入土壤中并充满整个筒体, 之后用塑料薄膜包裹底部, 采用精度为 0.1 g 的电子天平于每日 8:00 称取内筒质量, 2 d 测量差值即为土壤蒸发量. 为确保测量的准确性, 每隔 2 d 和灌水后及时更换内筒土样.

1.2.3 作物蒸腾

采用茎流计监测系统分别测量高水和低水处理的作物蒸腾量, 分别于 2015 年 5 月 15 日—7 月 15 日和 2016 年 4 月 14 日—7 月 10 日随机选择 4~6 棵长势均匀无病虫害的番茄植株进行测定. 为避免土壤热量干扰, 探头包裹在地表以上 20 cm 处, 为确保探头与茎秆紧密接触, 所选探头

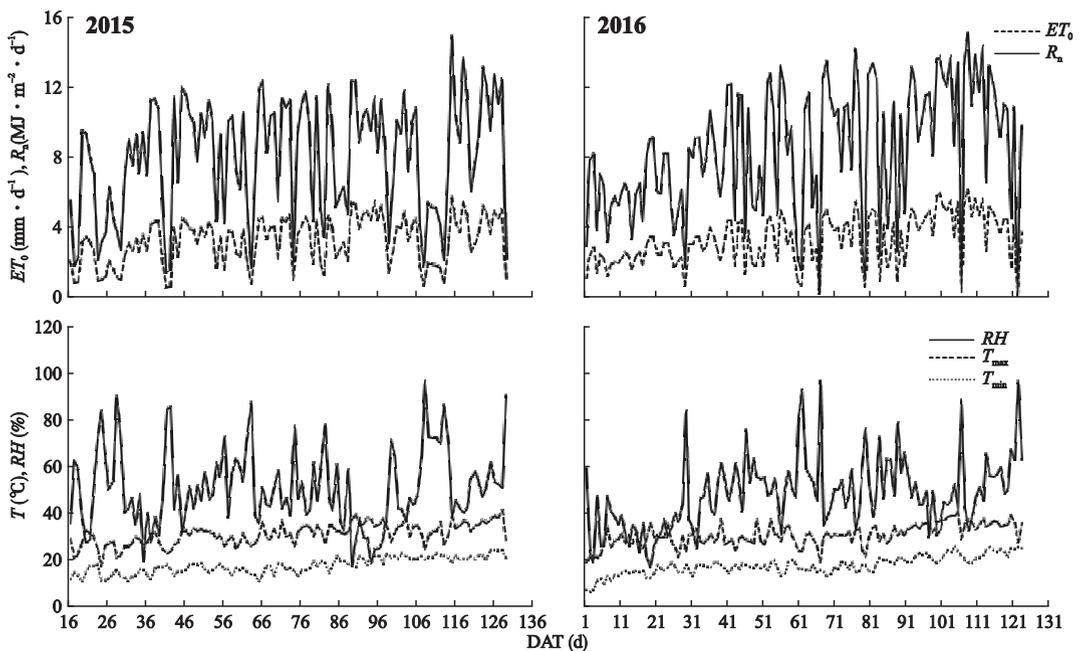


图 1 2015—2016 年温室内部气象因子逐日变化

Fig.1 Seasonal variations of climatic factors inside greenhouse in 2015–2016.

ET_0 : 参考作物蒸发蒸腾量 Reference evapotranspiration; R_n : 净辐射 Net radiation; T_{\max} : 最高温度 Maximum air temperature; T_{\min} : 最低温度 Minimum air temperature; RH_{\min} : 最小相对湿度 Minimum relative humidity; DAT: 移栽后天数 Days after transplanting. 下同 The same below.

尺寸规格需满足番茄茎秆直径要求,其标准化处理方法见文献[24].采用 CR1000 数据采集器每 15 min 自动记录一次数据.

1.2.4 总蒸发蒸腾量 采用 2 台称重式蒸渗仪(长×宽×高=1.0 m×1.0 m×1.2 m),于 2016 年分别测定高水和低水处理的总蒸发蒸腾量,蒸渗仪 1.0 m 深度内的土壤质地与田间相同.蒸渗仪安装在畦田中部,移栽时选 6 棵长势均匀无病虫害的幼苗定植于蒸渗仪内,其间距和行距与大田相同,为避免蒸渗仪受外界植株干扰,待株高长至 40 cm 时做搭架处理.

1.2.5 土壤水分和生长指标 土壤体积含水率采用 5 个 ECH₂O 土壤水分传感器进行测量,选择 2 个滴头中间位置,该位置最能表征小区整体的土壤水分状况^[22].将传感器探头分别埋置于地表以下 10、20、30、40 和 60 cm 处,数据由 EM50 数据采集器每隔 30 min 自动记录一次.每隔 7~10 d 采用直尺测量株高和叶面积,每个处理 9 次重复.叶面积采用折减系数法计算,具体方法见文献[25].分别在生育初期、发育期、生育中期和生育后期测定番茄的根系生长状况,采用根钻每 10 cm 一层将根系取出,直至没有根系为止.2015—2016 年不同生育期番茄的平均株高、叶面积指数(LAI)和最大根系深度见表 1.

1.3 双作物系数法

在双作物系数法中,将作物系数(K_c)分为基础作物系数(K_{cb})和土壤蒸发系数(K_e)两部分,分别用来估算作物蒸腾和土壤蒸发,采用 FAO 推荐的公式进行计算:

$$ET = (K_s K_{cb} + K_e) ET_0 \quad (1)$$

$$T = K_s K_{cb} ET_0 \quad (2)$$

$$E = K_e ET_0 \quad (3)$$

式中: ET 为蒸发蒸腾量(mm); T 为蒸腾量(mm); E 为蒸发量(mm); K_s 为水分胁迫系数; K_{cb} 为基础作物系数; K_e 为土壤蒸发系数; ET_0 为参考蒸发蒸腾量(mm).

1.3.1 参考蒸发蒸腾量 对于温室低风速特点,Fernández 等^[26-27]将空气动力学阻力项设为 $295 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$,带入 P-M 方程可准确估算温室作物参考蒸发蒸腾量(ET_0),并利用蒸渗仪数据进行了验证.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma[628D/(T_a + 273)]}{\Delta + 1.24\gamma} \quad (4)$$

式中: ET_0 为参考作物蒸发蒸腾量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); R_n 为净辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); γ 为干湿表常数($\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$); Δ 为温度随饱和水汽压变化的斜率($\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$); D 为饱和水汽压差(kPa); T_a 为空气温度(C).

1.3.2 作物系数和水分胁迫系数 1)基础作物系数.考虑番茄叶片在生育后期的衰老程度,采用 Ding 等^[9]推荐的方法计算基础作物系数(K_{cb}),计算公式如下:

$$K_{cb} = (1 - f_s) [K_{cb \min} + K_{cc}(K_{cb \text{ full}} - K_{cb \min})] \quad (5)$$

$$K_{cb \text{ full}} = \min(1.0 + 0.1h_c, 1.2) + [0.04(u - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45)](h_c/3)^{0.3} \quad (6)$$

$$K_{cc} = 1 - e^{-CLAI} \quad (7)$$

式中: $K_{cb \min}$ 是对于裸露土壤的最小基础作物系数(取 FAO 推荐值,0.01); $K_{cb \text{ full}}$ 是地表完全覆盖时的基础作物系数; K_{cc} 为冠层覆盖系数; f_s 为叶片衰老因子,生育初期、发育期和生育中期取值为 0,生育后期取值为 0.2; h_c 为植株高度(m); u 为 2 m 高度处风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); RH_{\min} 为最小相对湿度(%); C 为消光系数,取值 0.8^[28];LAI 为叶面积指数.

表 1 2015—2016 年不同水分处理下温室番茄各生育期的生长指标

Table 1 Growth indicators of tomato under different water condition in 2015—2016

测量指标 Measured indicator	生育期 Growth stage	2015		2016	
		高水	低水	高水	低水
		Full irrigation	Deficit irrigation	Full irrigation	Deficit irrigation
株高 Plant height (m)	生育初期 Initial stage	0.37	0.37	0.37	0.37
	发育期 Development stage	1.02	0.93	1.11	0.92
	生育中期 Middle stage	1.29	1.07	1.19	0.93
	生育后期 Later stage	1.22	0.95	1.24	0.98
叶面积指数 Leaf area index ($\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-2}$)	生育初期 Initial stage	0.40	0.40	0.41	0.41
	发育期 Development stage	2.16	1.54	1.91	1.72
	生育中期 Middle stage	3.53	2.62	3.20	2.55
	生育后期 Later stage	3.23	2.16	2.81	2.25
最大根系深度 Maximum root depth (m)	生育初期 Initial stage	0.30	0.30	0.30	0.30
	发育期 Development stage	0.50	0.50	0.50	0.50
	生育中期 Middle stage	0.80	1.00	0.90	1.00
	生育后期 Later stage	0.70	0.80	0.80	0.80

2) 土壤蒸发系数. 土壤蒸发系数(K_e)用来描述土壤蒸发部分, 采用 FAO-56 推荐的方法计算:

$$K_e = K_r (K_{c \max} - K_{cb}) \leq f_{ew} K_{c \max} \quad (8)$$

式中: K_e 是土壤蒸发系数; $K_{c \max}$ 是灌水后 K_e 的最大值; K_r 是取决于表层土壤蒸发累积深度的蒸发减小系数, 无量纲; f_{ew} 是裸露和湿润土壤的比值, 即最大的土壤蒸发面所占的百分比.

$$K_{c \max} = \max(\{1.2 + [0.04(u-2) - 0.004(RH_{\min} - 45)](h_c/3)^{0.3}\}, (K_{cb} + 0.05)) \quad (9)$$

$$f_{ew} = \min(1 - f_c, f_w) \quad (10)$$

式中: $1 - f_c$ 是裸露土壤的平均值; f_w 是灌水湿润的土壤表面平均值.

$$K_r = \frac{TEW - D_{e \ i-1}}{TEW - REW} \quad (11)$$

$$TEW = 1000(\theta_{FS} - 0.5\theta_{WS})Z_e \quad (12)$$

$$D_{e \ i} = D_{e \ i-1} - (P_i - RO_i) - \frac{I_i}{f_w} + \frac{E_{s \ i}}{f_{ew}} + T_{ew \ i} + DP_{e \ i} \quad (13)$$

式中: TEW 是总蒸发水量 (mm); REW 是第一阶段的蒸发累积深度 (mm); θ_{FS} 和 θ_{WS} 分别是表层土壤的田间持水率和凋萎系数 ($m^3 \cdot m^{-3}$); Z_e 是由于蒸发而变干的表土层深度 (m); $D_{e \ i}$ 和 $D_{e \ i-1}$ 分别是第 i 天和第 $i-1$ 天表层土壤的累积蒸发深度 (mm); P_i 是第 i 天的降雨量 (mm); RO_i 是第 i 天的地表径流量 (mm); I_i 是第 i 天渗入土壤的灌溉深度 (mm); $E_{s \ i}$ 是第 i 天的蒸发量 (mm); $T_{ew \ i}$ 是第 i 天表层土壤的蒸发深度 (mm); $DP_{e \ i}$ 是第 i 天土壤含水率超过田间持水量时产生的深层渗漏量 (mm). 由于温室中不存在降雨, 因此 P_i 为 0; 滴灌条件下不产生地表径流和深层渗漏, 因此 RO_i 和 $DP_{e \ i}$ 均为 0. 公式 (13) 可简化为:

$$D_{e \ i} = D_{e \ i-1} - \frac{I_i}{f_w} + \frac{E_{s \ i}}{f_{ew}} + T_{ew \ i} \quad (14)$$

3) 水分胁迫系数. 水分胁迫系数(K_s)对作物蒸腾的抑制作用主要依赖于作物根区的土壤水分条件^[7], 可用下式表示:

$$K_s = \frac{TAW - D_{r \ i-1}}{TAW - RAW} = \frac{TAW - D_{r \ i-1}}{(1-p)TAW} \quad (15)$$

$$TAW = 1000(\theta_{Fr} - \theta_{wr})Z_r \quad (16)$$

$$D_{r \ i} = D_{r \ i-1} - (P_i - RO_i) - I_i - CR_i + ET_{c \ i} + DP_i \quad (17)$$

式中: TAW 是根系层中的总有效水分 (mm); RAW 是根系层易被吸收的有效水量 (mm); p 是发生水分胁迫之前能从根系层中消耗的水量与土壤总有效水量的比值; Z_r 是变化的根系层深度 (m); $D_{r \ i}$ 和 $D_{r \ i-1}$ 分别是第 i 天和第 $i-1$ 天土壤根系层的消耗水量

(mm); CR_i 是第 i 天的地下水毛管上升水量 (mm); $ET_{c \ i}$ 是第 i 天作物蒸发蒸腾量 (mm); DP_i 是第 i 天根系层渗漏损失水量 (mm). 公式 (13) 可简化为下式:

$$D_{r \ i} = D_{r \ i-1} - I_i + ET_{c \ i} \quad (18)$$

用于计算土壤蒸发系数和水分胁迫系数的土壤参数以及初始值和率定值见表 2 和表 3.

1.4 数据分析与模型评价

采用 SPSS 20 统计软件对数据进行统计分析, 多重比较采用 LSD 法, 图表均采用 Microsoft Excel 2010 绘制. 分别用平均绝对误差 (MAE)、均方根误差 (RMSE) 和一致性指数 (d_1) 评价模型的精度^[29].

$$MAE = \sum_{i=1}^N |Q_i - P_i| / N \quad (19)$$

$$RMSE = \left[\sum_{i=1}^N (Q_i - P_i)^2 / N \right]^{1/2} \quad (20)$$

$$d_1 = 1 - \sum_{i=1}^N (Q_i - P_i)^2 / \sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{Q}| + |Q_i - \bar{Q}|)^2 \quad (21)$$

式中: P_i 和 Q_i 分别是模型模拟值和测量值; \bar{Q} 是所有测量值的平均值; N 为样本数. 当 $MAE = RMSE = 0$ 、 $d_1 = 1$ 时, 模型模拟效果最好.

2 结果与分析

2.1 不同生育阶段土壤蒸发和作物蒸腾的分配

对 2015 和 2016 年 2 种水分条件下不同生育期

表 2 用于计算土壤蒸发系数和水分胁迫系数的主要土壤参数

Table 2 Main soil parameters used for the determination of soil evaporation coefficient and water stress coefficient

土壤参数 Soil parameter	取值 Value	单位 Unit	来源 Source
土壤表层田间持水率 Surface soil field capacity (θ_{FS})	0.31	$m^3 \cdot m^{-3}$	实测值
土壤表层凋萎系数 Surface soil wilting point (θ_{WS})	0.10	$m^3 \cdot m^{-3}$	实测值
变化的最大根系深度 Variation of maximum root depth (Z_r)	0.2~1.0	m	实测值
灌水湿润的土壤表面平均值 Average fraction of soil surface wetted by irrigation (f_w)	0.35	-	FAO-56
植被覆盖的土壤面积比 Fraction of canopy cover (f_c)	0~0.8	-	实测值
叶片衰老系数 Leaf senescence factor (f_s)	0.20	-	实测值
根系层田间持水率 Root-zone soil field capacity (θ_{Fr})	0.32	$m^3 \cdot m^{-3}$	实测值
根系层凋萎系数 Root-zone soil wilting point (θ_{wr})	0.09	$m^3 \cdot m^{-3}$	实测值

在本试验中, 通过建立 f_c 与 LAI 线性关系得到 f_c . In this study, the f_c was obtained by establishing the liner equation between f_c and LAI.

表3 有关模型参数的初始值和率定值

Table 3 Initial and calibration values of model parameters

模型参数 Model parameter		生育初期 Initial stage	发育期 Development stage	生育中期 Middle stage	生育后期 Later stage
基础作物系数 Basal crop coefficient (K_{cb})	初始值 Initial value	0.15	0.15~1.10	1.10	0.6~0.8
	率定值 Calibration value	0.45	0.45~0.96	0.96	0.79
土壤水消耗比率 Ratio of soil water consumption (p)	初始值 Initial value	0.50	0.50	0.50	0.50
	率定值 Calibration value	0.40	0.40	0.40	0.40
由于蒸发而变干的表土层深度 Depth of the topsoil layer that was subject to drying by way of evaporation (Z_e , m)	初始值 Initial value	0.12	0.12	0.12	0.12
	率定值 Calibration value	0.10	0.10	0.10	0.10
总蒸发水量 Total evaporable water (TEW, mm)	初始值 Initial value	20	20	20	20
	率定值 Calibration value	19	19	19	19
易蒸发水量 Readily evaporable water (REW, mm)	初始值 Initial value	0.90	0.90	0.90	0.90
	率定值 Calibration value	0.80	0.80	0.80	0.80

土壤蒸发(E)、作物蒸腾(T)、蒸发蒸腾(ET)和蒸发量占蒸发蒸腾量的比值(E/ET)进行分析(表4),结果显示:在全生育期,高水和低水处理 ET 的2年均

表4 2015—2016年不同水分处理温室番茄各生育期的土壤蒸发量(E)、作物蒸腾量(T)、蒸发蒸腾量(ET)和蒸发量占总蒸发蒸腾量的比值(E/ET)Table 4 Soil evaporation (E), crop transpiration (T), evapotranspiration (ET) and the ratio of evaporation to evapotranspiration (E/ET) under different water conditions at different growth stages in 2015–2016

生育期 Stage	指标 Index	高水 Full irrigation		低水 Deficit irrigation	
		2015	2016	2015	2016
		生育初期 Initial stage	E (mm)	18.84	20.03
	T (mm)	12.24	14.12	11.28	13.52
	ET (mm)	31.08	34.15	30.36	33.38
	E/ET	0.61	0.59	0.63	0.59
发育期 Development stage	E (mm)	19.39	22.70	15.39	19.41
	T (mm)	70.99	73.41	66.93	72.29
	ET (mm)	90.38	96.11	82.32	91.70
	E/ET	0.21	0.24	0.19	0.21
生育中期 Middle stage	E (mm)	20.81	21.76	17.04	18.19
	T (mm)	108.88	87.63	83.73	62.49
	ET (mm)	129.69	109.39	100.77	80.68
	E/ET	0.16	0.20	0.17	0.23
生育后期 Later stage	E (mm)	26.82	25.83	15.92	14.40
	T (mm)	82.45	95.15	50.83	54.87
	ET (mm)	109.27	120.98	66.75	69.27
	E/ET	0.25	0.21	0.24	0.21
全生育期 Whole stage	E (mm)	85.86	90.32	67.43	71.86
	T (mm)	274.56	270.31	212.77	203.17
	ET (mm)	360.42	360.63	280.20	275.03
	E/ET	0.24	0.25	0.24	0.26

2015年生育初期和发育期的 ET 为水量平衡法计算所得, $T=ET-E$; 2016年各生育期的 ET 均为称重式蒸渗仪测量值,生育初期的 $T=ET-E$ In 2015, the ET of initial and development stage was calculated by water balance method, and $T=ET-E$; the ET was measured by weighing lysimeter in whole growing stage in 2016, and $T=ET-E$.

值分别为360.53和277.62 mm, E 均值分别为88.09和69.65 mm, T 均值分别为272.44和207.97 mm,2年高水和低水处理的 E/ET 差异不大,在0.24~0.26之间变化。番茄发育初期 E 较高,为18.84~20.03 mm,而 T 较低,仅为11.28~14.12 mm, E/ET 在全生育期最大,为0.59~0.63。随着生育期的推进,发育期番茄LAI逐渐增大,此时 T/ET 随之增大而 E/ET 逐步减小,2年高水和低水处理的 E/ET 均值分别为0.23和0.20。生育中期,番茄LAI达到最大,水分差异也逐渐增大,此时 T 达到最大而 E 降到最小,2年高水和低水处理 T 的均值分别为98.26和73.11 mm, E 的均值分别为21.29和17.62 mm, E/ET 均值分别为0.18和0.20。生育后期,番茄叶片逐渐衰老,2年高水和低水处理 E 的均值分别为26.33和15.16 mm, E/ET 分别为0.23和0.22。

温室番茄 E/ET 在发育初期最大,随着LAI的增加而逐渐减小,2015和2016年全生育期高水处理的 E 分别为低水处理的21.5%和20.4%,占 ET 的24.0%和25.0%,是不可忽视的一部分。

2.2 水分胁迫对作物系数的影响

为清楚地反映不同水分处理对温室滴灌番茄作物系数(K_c)的影响,本文利用2016年蒸渗仪数据获取了不同水分条件下 K_c 在整个生育期的变化过程,并与计算的作物系数($K_{cb}+K_c$)进行了对比。由图2可以看出,高水处理的作物系数(K_{c-F})与 $K_{cb}+K_c$ 之间无明显差异,而低水处理的作物系数(K_{c-D})与 $K_{cb}+K_c$ 之间有一定差异性,这种差异主要表现在生育中、后期。生育初期和发育期温室番茄的作物系数均值分别为0.45和0.89,高水条件下,生育中期和生育后期分别为1.06和0.93,而低水处理分别为

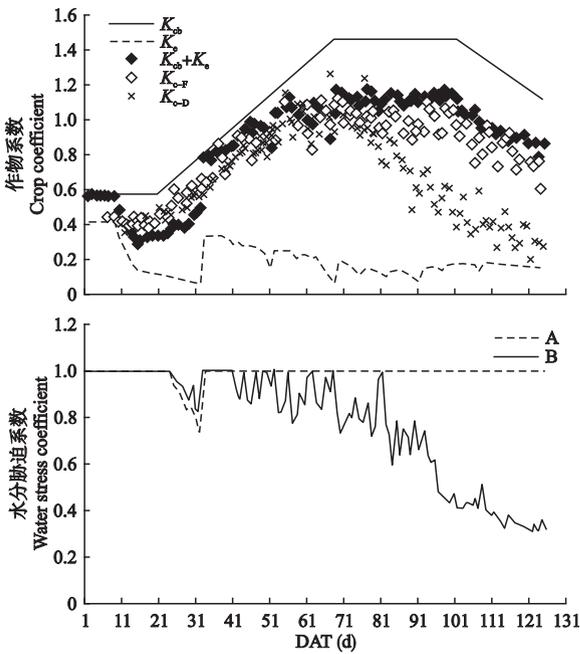


图2 2016年温室番茄作物系数和水分亏缺系数的变化
Fig.2 Variations of crop coefficient and water stress coefficient of greenhouse tomato in 2016.

A: 高水处理 Full irrigation; B: 低水处理 Deficit irrigation. 下同 The same below. K_{cb} : 基础作物系数 Basal crop coefficient; K_s : 土壤蒸发系数 Soil evaporation coefficient; $K_{cb}+K_s$: 计算的作物系数 Calculated crop coefficient, K_{c-F} : 测量的高水处理作物系数 Measured crop coefficient under full irrigation; K_{c-D} : 测量的低水处理作物系数 Measured crop coefficient under deficit irrigation.

0.87和0.41.土壤蒸发系数(K_s)是量化土壤蒸发的重要参数.生育初期 K_s 值较大,在0.06~0.43,进入

发育期,随着 LAI 的增大, K_s 值逐步减小,但灌水之后 K_s 值有明显增大迹象,发育期 K_s 在0.15~0.34;生育中、后期,灌水频繁,表层土壤始终处于湿润状态, K_s 波动幅度减弱,在0.07~0.19.水分胁迫系数(K_s)抑制了作物的蒸腾作用,高水和低水处理在进入发育期之前(4月1—10日)都出现了一定的水分胁迫,这是由于番茄进入发育期之前,为了强化根系生长,生育初期无补水措施;从发育期到生育中期,随着番茄需水量的增大,低水处理的 K_s 值逐步降低,灌水之后有明显增大迹象;生育后期,土壤水分库存量已无法满足番茄的需水强度, K_s 值下降到最低水平,全生育期 K_s 值在0.32~1.0.高水处理的作物系数与实测值吻合度较高,而水分胁迫明显降低了番茄的作物系数,在生育中、后期表现尤为明显.0.5 E_p 的灌水定额明显降低了作物的耗水量,水分胁迫系数在生育后期降到最低.

2.3 蒸发蒸腾量的模拟结果

于2015和2016年采用双作物系数法分别估算高水和低水处理的蒸发蒸腾量,并与实测结果进行对比(图3和表5).结果表明,蒸发蒸腾量的估算值(ET_c)与实测值(ET_m)有较好的一致性,2015年高水和低水处理的 MAE 分别为 0.36 和 0.48 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$, RMSE 分别为 0.44 和 0.45 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$, d_1 分别为 0.98 和 0.93; 2016 年高水和低水处理的 MAE 分

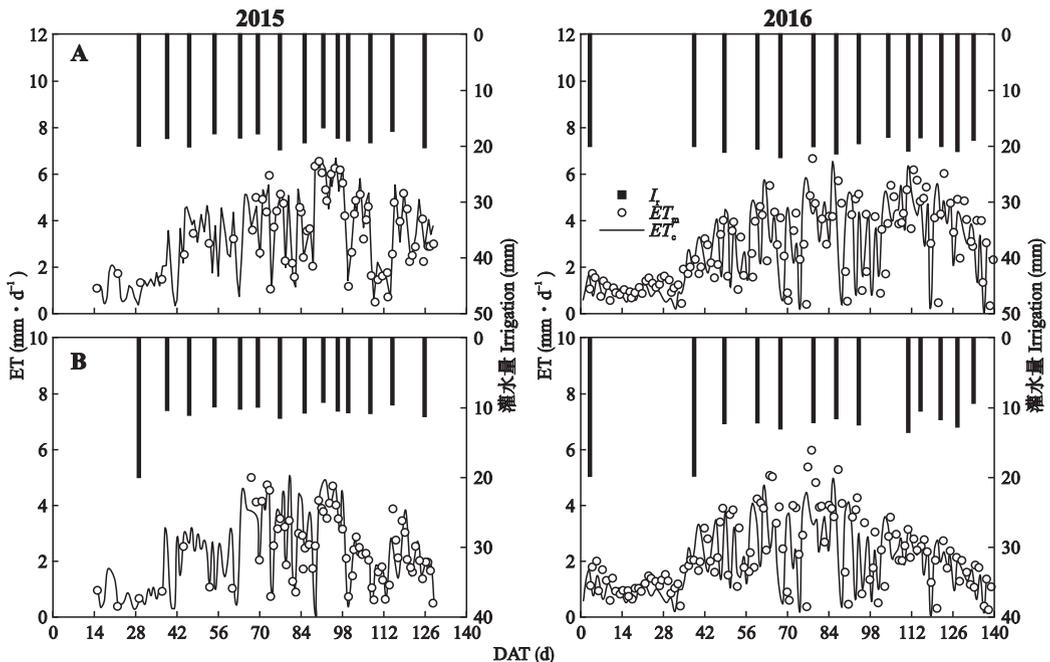


图3 2015、2016年不同水分处理温室番茄蒸发蒸腾量模拟值与实测值对比

Fig.3 Comparison of daily measured and calculated values of evapotranspiration under different water conditions in 2015, 2016.

I_i : 灌水量 Irrigation amount; ET_m : 实测蒸发蒸腾量 Measured evapotranspiration; ET_c : 计算蒸发蒸腾量 Calculated evapotranspiration.

表 5 2015—2016 年不同水分处理蒸发量 (E)、蒸腾量 (T) 和蒸发蒸腾量 (ET) 的模拟值与测量值的统计分析
 Table 5 Statistical analysis of measured and calculated soil evaporation (E), transpiration (T) and daily evapotranspiration (ET) under different water conditions in 2015–2016

年份 Season	指标 Index	高水 Full irrigation				低水 Deficit irrigation			
		R^2	MAE	RMSE	d_1	R^2	MAE	RMSE	d_1
2015	E (mm)	0.41**	0.15	0.20	0.85	0.34**	0.19	0.23	0.62
	T (mm)	0.89**	0.38	0.51	0.97	0.59**	0.56	0.72	0.87
	ET (mm)	0.93**	0.36	0.44	0.98	0.77**	0.48	0.65	0.93
2016	E (mm)	0.48**	0.18	0.23	0.82	0.36**	0.18	0.24	0.80
	T (mm)	0.88**	0.26	0.33	0.97	0.81**	0.51	0.69	0.94
	ET (mm)	0.92**	0.39	0.47	0.98	0.91**	0.41	0.52	0.95

2015 年 5 月 15 日之前的 ET 实测值为水量平衡法所得, 2015 年 5 月 15 日之后的 ET 为实测土壤蒸发+实测植株蒸腾所得; 2016 年实测 ET 为 2 台称重式蒸渗仪的平均值 ET was calculated by water balance method before May 15, 2015, while ET was obtained by E measured by micro-lysimeter plus T measured by sap flow meter after May 15, 2015; the average ET was measured by two weighing lysimeter in whole growing stage in 2016. R^2 : 决定系数 Determinant coefficient; MAE: 平均绝对误差 Mean absolute error; RMSE: 均方根误差 Root mean square error; d_1 : 一致性指数 Index of agreement.

别为 0.39 和 0.47 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$, RMSE 分别为 0.44 和 0.52 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$, d_1 分别为 0.98 和 0.95, 可见, 双作物系数法在估算高水处理 ET 精度方面好于低水处理。双作物系数法能够较好地区分作物蒸腾量 (T) 和土壤蒸发量 (E), 在 T 方面, 2015 年高水和低水处理的 MAE 分别为 0.38 和 0.56 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$, RMSE 分别为 0.51 和 0.72 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$, d_1 分别为 0.97 和 0.87; 2016 年高水和低水处理的 MAE 分别为 0.26 和 0.51 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$, RMSE 分别为 0.33 和 0.69 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$, d_1 分别为 0.97 和 0.94。在 E 方面, 2015 年高水和低水处理的 MAE 分别为 0.15 和 0.19 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$, RMSE 分别为 0.20 和 0.23 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$, d_1 分别为 0.85 和 0.62; 2016 年高水和低水处理的 MAE 均为 0.18 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$, RMSE 分别为 0.23 和 0.24 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$, d_1 分别为 0.82 和 0.80。土壤水分的变化同样会影响双作物系数法的估算精度, 如灌水前后表层土壤水分的急剧增加会导致 ET 的低估。选择灌水前后均为晴天的天气状况进行分析, 如 2016 年 5 月 16 日的高水处理, 相比灌水前, 灌水后 ET 增加 23.8%, 但双作物系数法低估了 12.2% 的 ET ; 对于低水处理, 相比灌水前, 灌水后 ET 增加 10.9%, 但双作物系数法低估了 24.8% 的 ET 。

采用双作物系数法估算 E 、 T 和 ET 时, 高水处理的模拟精度好于低水处理, 但由于统计参数均在合理范围内, 且估算值与实测值之间呈极显著相关水平 ($P < 0.01$), 表明双作物系数法在不同水分条件下具有较好的适用性。此外, 由于灌水后表层土壤水分急剧增加, 使得双作物系数法低估了 ET 。

3 讨 论

温室滴灌条件下, 2015 和 2016 年全生育期高水处理土壤蒸发量分别为低水处理的 21.5% 和

20.4%, 占蒸发蒸腾量的 24.7%, 是不可忽视的一部分。温室番茄生育初期的 E/ET 值最大, 为 0.59 ~ 0.63, 随着 LAI 的增加逐步降低, 生育中期降到最低水平, 仅为 0.16 ~ 0.23 (表 4)。与温室畦灌相比, 全生育期滴灌番茄的 E/ET 值较畦灌白菜低 37.2%, 较畦灌萝卜低 35.0%, 畦灌白菜和萝卜在生育初期的土壤蒸发量分别为 40.81 和 38.26 mm, 均高于滴灌番茄^[2-3]。这与表层含水量有关, 由于畦灌灌水量大 (80% 田间持水率), 灌溉之后表层土壤含水率较高 ($> 0.3 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), 土壤蒸发处于稳定蒸发阶段, 水分向上输送能力较强^[30]。

高水处理下温室番茄的作物系数 (K_c) 在生育初期、发育期、生育中期和生育后期分别为 0.45、0.89、1.06 和 0.93, 而水分胁迫条件下的 K_c 值分别为 0.45、0.89、0.87 和 0.41 (图 2), 低水处理下水分胁迫系数降低了番茄在生育中、后期的 K_c 。基础作物系数 (K_{cb}) 受气候条件、作物类型、地表覆盖和水盐胁迫等多因素的综合影响^[7], 对于室外番茄 K_{cb} , Bonachela 等^[15] 得出地中海气候区番茄生育中、后期的 K_{cb} 分别为 1.4 和 1.0, Hanson 等^[16] 利用 3 年试验得出沟灌和滴灌条件下番茄生育中期的 K_{cb} 在 0.96 ~ 1.09; 对于温室番茄 K_{cb} , Abedikoupai 等^[17] 确定了伊朗地区温室番茄 K_{cb} 在生育初期、发育期、生育中期和生育后期分别为 0.44、0.68、1.15 和 0.68, 邱让建等^[20] 利用 SIMDual K_c 模型确定了西北旱区温室覆膜沟灌条件下番茄的 K_{cb} , 在生育初期、中期和后期分别为 0.40、0.85 和 0.55; 石小虎等^[21] 利用 SIMDual K_c 模型得到覆膜沟灌番茄的 K_{cb} , 生育初期为 0.34, 发育期为 0.34 ~ 1.16, 生育中期为 1.16, 生育后期为 0.63, 出现这些差异的可能原因是: 1) 地表覆膜降低了 5% ~ 15% 的 K_{cb} ^[7]; 2) 相比室外番茄 K_{cb} ,

温室内的低湿度和低风速特征导致了更低的 K_{cb} 值; 3) 由于环境气候和番茄类型的差异, 对 K_{cb} 进行调整时造成的差异^[7]. 当根系层土壤水分不能完全满足作物蒸腾耗水时, 作物开始受水分胁迫的影响, 导致作物蒸腾作用减弱, 水分胁迫系数(K_s)逐步减小. 低水处理下 K_s 在 0.32~1.0, 生育后期降到最低(图 2). Razmi 等^[18]认为, 灌水时间间隔延迟 4 d, 则 K_s 减小 18.2%; 石小虎等^[21]认为, 番茄在发育期亏水 50% 时, 发育期、生育中期和生育后期的 K_s 分别为 0.8、0.94 和 0.98, 发育期和生育中期都亏水 50% 时, K_s 分别为 0.8、0.69 和 0.91, 发育期、生育中期和生育后期连续亏水 50% 时, K_s 分别为 0.8、0.7 和 0.63. 这些结论与本研究结果不同, 可能原因是不同灌水定额造成的. 本试验中, 生育中、后期番茄的有效根系层深度为 60 cm, 且滴灌灌水量少, 难以入渗至 60 cm 处, 根系对灌溉水的利用率降低, 导致更低的 K_s . 而塑料地膜能有效阻隔土壤水分的蒸发, 蒸发的水分又通过地膜的阻挡作用一部分返回土壤中, 因此覆膜后的 K_s 高于本研究结果.

双作物系数法能很好估算不同水分下的 ET (表 5), Liu 等^[10]、Rosa 等^[31]、González 等^[32] 分别在水分胁迫和盐分胁迫下估算了夏玉米、冬小麦和甜高粱的 ET , 并采用 SIMDualK_c 模型对模拟结果进行验证, 均取得了较好的效果. 但在水分胁迫条件下, 相比高水处理, 双作物系数法低估了 E 、 T 和 ET , 可能原因包括 2 方面: 1) 水分胁迫系数与有效根系层深度密切相关, 根系层是计算水分胁迫系数的一项敏感因子, 不同生育期根系层的变化导致对 T 的低估^[33-34]; 2) 滴灌灌水频率大, 灌水后表层土壤处于稳定蒸发阶段, 该阶段土壤蒸发主要取决于大气蒸发力, 与土壤水分无关^[30], 而双作物系数法在估算 E 时, 主要取决于表层土壤水分状况, 从而导致 E 的估算结果偏低. 本研究结论与前人研究类似^[33-35]. 此外, 由于灌水后表层土壤水分的急剧增加也会影响双作物系数法对 ET 的估算精度, 其中, 高水处理低估了 12.2% 的 ET , 而低水处理低估了 24.8% (图 4). Liu 等^[10]、Er-Raki 等^[33-34]、Zhao 等^[35] 也得到了类似结论. 虽然双作物系数法在估算高水和低水 E 和 T 时有一定偏差, 但其统计参数均在合理范围之内, 因此, 推荐采用双作物系数法估算温室滴灌番茄的 ET , 并采用该结果指导华北地区日光温室番茄的灌溉制度.

4 结 论

土壤蒸发是温室作物蒸发蒸腾不可忽视的一部

分, 尤其在生育初期. 高水和低水处理的作物系数在生育初期和发育期无差异, 分别为 0.45 和 0.89, 而在生育中期和生育后期具有明显的差异性, 高水处理分别为 1.06 和 0.93, 低水处理仅为 0.87 和 0.41. 水分胁迫系数在生育中、后期下降到最低水平, 为 0.32. 双作物系数法可较好地估算不同水分条件下温室滴灌番茄的 E 、 T 和 ET , 但高水处理的模拟精度好于低水处理.

参考文献

- [1] Baptista FJ, Bailey BJ, Meneses JF. Measuring and modelling transpiration versus evapotranspiration of a tomato crop grown on soil in a Mediterranean greenhouse. *Acta Horticulturae*, 2005, **691**: 313-320
- [2] Liu H (刘浩), Sun J-S (孙景生), Duan A-W (段爱旺), et al. Experiment on soil evaporation among plant of Chinese cabbage in sunlight greenhouse. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2008, **22**(1): 207-211 (in Chinese)
- [3] Liu H (刘浩), Sun J-S (孙景生), Duan A-W (段爱旺), et al. Experiment on soil evaporation of radish in sunlight greenhouse. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2009, **25**(1): 176-180 (in Chinese)
- [4] Kool D, Agam N, Lazarovitch N, et al. A review of approaches for evapotranspiration partitioning. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, **184**: 56-70
- [5] Monteith JL. Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 1965, **19**: 205-234
- [6] Shuttleworth WJ, Wallace JS. Evaporation from sparse crops: An energy combination theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1985, **111**: 839-855
- [7] Allen RG, Pereira LS, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Italy: FAO, 1998
- [8] 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
- [9] Ding RS, Kang SZ, Zhang YQ, et al. Partitioning evapotranspiration into soil evaporation and transpiration using a modified dual crop coefficient model in irrigated maize field with ground-mulching. *Agricultural Water Management*, 2013, **127**: 85-96
- [10] Liu YJ, Luo Y. A consolidated evaluation of the FAO-56 dual crop coefficient approach using the lysimeter data in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 2010, **97**: 31-40
- [11] Li Y-L (李玉霖), Cui J-Y (崔建垣), Zhang T-H (张铜会). Measurement of evapo-transpiration and crop coefficient of irrigated spring wheat in Naiman sandy cropland. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(6): 930-934 (in Chinese)
- [12] Jia Z-J (贾志军), Han L (韩琳), Wang G (王鸽), et al. Adaptability analysis of FAO Penman-

- Monteith model over typical underlying surfaces in the Sanjiang Plain, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2014, **25**(5): 1327-1334 (in Chinese)
- [13] Lazzara P, Rana G. The use of crop coefficient approach to estimate actual evapotranspiration: A critical review for major crops under Mediterranean climate. *Italian Journal of Agrometeorology*, 2010, **15**: 25-39
- [14] Fathalian F, Nouri Emamzadei MR. Determination of evapotranspiration and crop coefficient of cucumber by using microlysimeter in greenhouse conditions. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, 2013, **6**: 125-133
- [15] Bonachela S, González AM, Fernández MD. Irrigation scheduling of plastic greenhouse vegetable crops based on historical weather data. *Irrigation Science*, 2006, **25**: 53-62
- [16] Hanson BR, May DM. Crop evapotranspiration of processing tomato in the San Joaquin Valley of California, USA. *Irrigation Science*, 2006, **24**: 211-221
- [17] Abedikoupai J, Eslamian SS, Zareian MJ. Measurement and modeling of water requirement and crop coefficient for cucumber, tomato and pepper using microlysimeter in greenhouse. *Journal of Science & Technology of Greenhouse Culture*, 2011, **2**: 51-64
- [18] Razmi Z, Ghaemi AA. Crop and soil-water stress coefficients of tomato in the glass-greenhouse conditions. *Journal of Science & Technology of Greenhouse Culture*, 2011, **2**: 21-34
- [19] Qiu RJ, Song JJ, Du TS, et al. Response of evapotranspiration and yield to planting density of solar greenhouse grown tomato in northwest China. *Agricultural Water Management*, 2013, **130**: 44-51
- [20] Qiu R-J (邱让建), Du T-S (杜太生), Chen R-Q (陈任强). Application of the dual crop coefficient model for estimating tomato evapotranspiration in greenhouse. *Journal of Hydraulic Engineering (水利学报)*, 2015, **46**(6): 678-686 (in Chinese)
- [21] Shi X-H (石小虎), Cai H-J (蔡焕杰), Zhao L-L (赵丽丽), et al. Estimation of greenhouse tomato evapotranspiration under deficit irrigation based on SIMDualKc model. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (农业工程学报)*, 2015, **31**(22): 131-138 (in Chinese)
- [22] Liu H (刘浩). Water Requirement and Optimal Irrigation Index for Effective Water Use and High-quality of Tomato in Greenhouse. PhD Thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010 (in Chinese)
- [23] Liu H, Duan AW, Li FS, et al. Drip irrigation scheduling for tomato grown in solar greenhouse based on pan evaporation in North China Plain. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, **12**: 520-531
- [24] Liu H (刘浩), Sun J-S (孙景生), Duan A-W (段爱旺), et al. Experiments on variation of tomato sap flow under drip irrigation conditions in greenhouse. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (农业工程学报)*, 2010, **26**(10): 77-82 (in Chinese)
- [25] Liu H (刘浩), Sun J-S (孙景生), Duan A-W (段爱旺), et al. Simple model for tomato and green pepper leaf area based on AutoCAD software. *Chinese Agricultural Science Bulletin (中国农学通报)*, 2009, **25**(5): 287-293 (in Chinese)
- [26] Fernández MD, Bonachela S, Orgaz F, et al. Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate. *Irrigation Science*, 2010, **28**: 497-509
- [27] Fernández MD, Bonachela S, Orgaz F, et al. Erratum to: Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate. *Irrigation Science*, 2011, **29**: 91-92
- [28] Goudriaan J, Van Laar HH. Modelling Potential Crop Growth Processes: Textbook with Exercises. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994
- [29] Willmott CJ, Matsuura K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 2005, **30**: 79-82
- [30] Wang Z-N (汪志农). Irrigation and Drainage Engineering. Beijing: China Agriculture Press, 2010 (in Chinese)
- [31] Rosa RD, Ramos TB, Pereira LS. The dual Kc approach to assess maize and sweet sorghum transpiration and soil evaporation under saline conditions: Application of the SIMDualKc model. *Agricultural Water Management*, 2016, **177**: 77-94
- [32] González MG, Ramos TB, Carlesso R, et al. Modelling soil water dynamics of full and deficit drip irrigated maize cultivated under a rain shelter. *Biosystems Engineering*, 2015, **132**: 1-18
- [33] Er-Raki S, Chehbouni A, Boulet G, et al. Improvement of FAO-56 method for olive orchards through sequential assimilation of thermal infrared-based estimates of ET. *Agricultural Water Management*, 2008, **95**: 309-321
- [34] Er-Raki S, Chehbouni A, Boulet G, et al. Using the dual approach of FAO-56 for partitioning ET into soil and plant components for olive orchards in a semi-arid region. *Agricultural Water Management*, 2010, **97**: 1769-1778
- [35] Zhao P, Li SE, Li FS, et al. Comparison of dual crop coefficient method and Shuttleworth-Wallace model in evapotranspiration partitioning in a vineyard of northwest China. *Agricultural Water Management*, 2015, **160**: 41-56

作者简介 龚雪文,男,1987年生,博士研究生.主要从事作物水分生理与高效利用研究. E-mail: gxw068@126.com

责任编辑 杨弘

龚雪文,刘浩,孙景生,等.基于双作物系数法估算不同水分条件下温室番茄蒸发蒸腾量.应用生态学报,2017,**28**(4): 1255-1264

Gong X-W, Liu H, Sun J-S, et al. Modeling evapotranspiration of greenhouse tomato under different water conditions based on the dual crop coefficient method. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(4): 1255-1264 (in Chinese)