

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.06.061

基于室外气象信息的温室通风期室内参考作物蒸发蒸腾量估算模型

龚雪文^{1,2} 李雨¹ 葛建坤^{1,2} 刘浩^{2,3} 李欢欢^{2,3} 强小嫚^{2,3} 张磊^{1,2}

(1. 华北水利水电大学水利学院, 郑州 450046; 2. 河南省节水农业重点实验室, 郑州 450046;
3. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 新乡 453003)

摘要: 为实现温室作物灌溉管理的便利化, 构建了基于室外气象信息估算温室通风期室内参考作物蒸发蒸腾量 (Reference evapotranspiration, ET_o) 模型。于 2020、2021 年 5—6 月在塑料大棚牧草栽培条件下开展试验研究, 利用 Penman-Monteith (PM) 方程计算了温室内部和外部 ET_o , 并分析了温室内外 ET_o 的辐射分量 (Radiative component of ET_o , $ET_{o,rad}$) 和平流分量 (Advection component of ET_o , $ET_{o,adv}$) 变化特征, 通过引入辐射透射率 τ 和风速衰减率 ω 分别对方程中的辐射分项方程和平流分项方程进行了改进, 构建了基于室外气象信息估算室内 ET_o 简易模型。结果表明: 温室内平均 ET_o 、 $ET_{o,rad}$ 和 $ET_{o,adv}$ 较室外分别减少 45.6%、17.1% 和 94.0%; 试验期间辐射分量衰减因子 ζ_{rad} 、平流分量衰减因子 ζ_{adv} 和总通量衰减因子 ζ_o 总体上表现为 $\zeta_{rad} > \zeta_o > \zeta_{adv}$, 2 年平均 ζ_{rad} 较 ζ_o 和 ζ_{adv} 分别高 23.1%~33.3% 和 90.1%~93.3%。 ζ_{rad} 与 τ 以及 ζ_{adv} 与 ω 之间存在极显著线性关系 ($P < 0.01$), 决定系数 (R^2) 分别为 0.74 和 0.90, 平均绝对误差 (MAE) 分别为 0.07 和 0.04, 均方根误差 (RMSE) 分别为 0.09 和 0.05。构建的基于室外气象信息估算室内 ET_o 简易模型方程包括室外净辐射、空气温度、水汽压差和风速 4 个气象因子以及 τ 、 ω 2 个温室特征因子, 通过与实测结果比较发现模型精度稳健, R^2 为 0.96, MAE 和 RMSE 分别为 0.17、0.22 mm/d。该模型精度高、参数少、易获取, 为温室群灌溉管理便利化提供了方法参考。

关键词: 气象信息; 温室; 参考作物蒸发蒸腾量; 辐射和平流分量; 模型模拟

中图分类号: S274.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)06-0649-11 OSID: 

Calculation Model of Reference Crop Evapotranspiration in Greenhouse Based on Outdoor Meteorological Data during Ventilation

GONG Xuewen^{1,2} LI Yu¹ GE Jiankun^{1,2} LIU Hao^{2,3} LI Huanhuan^{2,3} QIANG Xiaoman^{2,3} ZHANG Lei^{1,2}

(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China
2. Henan Province Key Laboratory of Water Saving Agriculture, Zhengzhou 450046, China
3. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453003, China)

Abstract: Aiming to facilitate irrigation management of crops grown in greenhouse, a model was developed to estimate the reference evapotranspiration (ET_o) inside greenhouse during ventilation by using outdoor meteorological data. An experimental study was carried out in May–June 2020, 2021 under grass cultivation conditions in a plastic greenhouse. The Penman-Monteith (PM) equation was used to calculate ET_o inside and outside the plastic greenhouse, and variations of the ET_o radiative component ($ET_{o,rad}$) and the ET_o advection component ($ET_{o,adv}$) inside and outside were also analyzed. Thereafter, the radiative transmittance τ and wind speed attenuation rate ω were introduced to improve the radiative and advection sub-equations of the ET_o equation, then a simple model for estimating indoor ET_o was constructed based on outdoor meteorological data. The results showed that the average ET_o , $ET_{o,rad}$, and $ET_{o,adv}$ of indoors were decreased by 45.6%, 17.1%, and 94.0%, respectively, compared with that of outdoors. During the experiment, the attenuation factors of radiation components ζ_{rad} ,

advection components ζ_{adv} , and total flux ζ_o showed a tendency of $\zeta_{rad} > \zeta_o > \zeta_{adv}$. The two years average ζ_{rad} was 23.1% to 33.3% and 90.1% to 93.3% higher than that of ζ_o and ζ_{adv} , respectively. Furthermore, a highly significant linear relationship ($P < 0.01$) between ζ_{rad} and τ , as well as between ζ_{adv} and ω was found, with R^2 of 0.74 and 0.90, MAE of 0.07 and 0.04, RMSE of 0.09 and 0.05, respectively. The simple model equation for estimating indoor ET_o based on outdoor meteorological information included four meteorological parameters, including net radiation, air temperature, water vapour pressure deficit, and wind speed, moreover, two greenhouse characteristic factors, τ and ω were also considered. The developed model was robust by comparing with the measurements, with R^2 of 0.96, MAE and RMSE of 0.17 mm/d and 0.22 mm/d, respectively. This model developed had high precision and few parameters, and was easy to obtain, which can provide a reference method for the facilitation of greenhouse group irrigation management.

Key words: meteorological information; greenhouse; reference crop evapotranspiration; radiation and advective components; modelling

0 引言

截止 2023 年底,我国设施种植面积已超过 $2.8 \times 10^6 \text{ hm}^2$,位居世界首位,极大地保障了居民对新鲜蔬菜消费的日益多元化需求。目前,我国设施类型仍以日光温室和塑料大棚等传统结构为主,占总规模的 90% 以上,其中塑料大棚占比 57.7%^[1]。传统温室通风换气主要依赖于自然通风,通过自然通风可以在温室内形成空气对流,使温室内外环境之间以及作物与环境之间进行足够的质热交换^[2],如果能利用室外常规气象信息实现对温室内部作物需水量的准确预测,将为温室管理及其作物灌溉的便利化提供有效的理论支撑。

以温室气候为输入条件的蒸散发模型最早出现在欧洲北部和北美地区的玻璃温室中^[3-5],在玻璃温室环境中,作物与室外大气之间表现为解耦,作物表面释放的热量 and 水分主要积聚在室内^[6],因此利用室外气象信息计算室内作物需水量难度较大。而我国传统温室环境调控主要采用自然通风模式,利用通风口开启状态进行室内外气流交换,温室作物与室外大气之间表现为较强耦合关系^[7-9],因此利用室外气象信息计算温室通风期间室内作物需水量具有可行性。目前蒸散发模型理论多是在能量平衡和物质传输基础上构建的^[10],随着模型不断发展,温室作物蒸散发模型通过改进模型参数以提高其模拟精度,而模型参数的改进主要考虑温室特殊小气候对作物水分传输的影响^[11-14]。研究表明作物蒸散发与叶片周围水汽压差密切相关,其中饱和亏缺与周围空气的亏缺程度有关,而后者在气流交换过程中又受到室外饱和亏缺的影响^[15],这部分属于蒸散发模型的平流分项,有研究发现,对于温室番茄,5—6 月平流分量占总蒸腾量的比例高达 43%^[16],是不可忽视的分量之一。除平流分量外,辐射分量也是影响作物蒸散发的重要分项,温室作物接收的

辐射强度与大田作物差异较大,主要原因是塑料薄膜的覆盖改变了净短波辐射和净长波辐射,KITTA 等^[17]发现覆盖条件下净短波辐射和净长波辐射均有所减弱,但室内净长波辐射的损失相比室外更小;SAADON 等^[18]认为净辐射是估算温室作物需水量的重要环境因子,并利用室外太阳辐射作为唯一气象参数计算了室内净辐射,提高了模型精度。可见,辐射分量和平流分量是蒸散发模型中的两个重要分项,是模型改进的重点^[19-20]。

作为气象驱动的参考作物蒸发蒸腾量(ET_o)是计算实际作物需水量的重要指标,世界粮食及农业组织推荐的 Penman - Monteith (PM) 方程是目前计算 ET_o 使用最多的方法,主要由辐射和平流两个分项组成。之前的研究采用 PM 公式计算温室内部作物蒸散量时^[21-22],需连续测量室内的净辐射、空气温度、相对湿度和风速等多个气象参数;之后 BOULARD 等^[15]开发了 PM - 能量平衡法,可利用室外气象数据估算室内作物需水量,但该方法涉及通风量、水蒸气转换系数、感热和潜热传输系数、温室内外温差热交换系数等多个较难获取参数,增加了模型不确定性。因此,从实用和经济角度来看,上述方法难以推行。

为解决上述问题,本研究拟改进 PM 方程中的辐射分项和平流分项,通过在辐射分项中引入辐射透射率(室内太阳辐射与室外太阳辐射比值),在平流分项中引入风速衰减率(室内风速与室外风速比值),构建结构简洁且参数少的新模型,以期实现温室通风期间利用室外气象信息计算室内作物需水量的目标,为温室作物管理及其灌溉制度便利化提供理论和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2020、2021 年在河南省农业高效用水试

验基地(34°47'N,113°47'E,海拔 81.2 m)塑料大棚内进行,试验区多年平均气温为 14.7℃,年均降水量为 618 mm,年均日照时数为 2 370 h。土壤类型主要为黏壤土,0~100 cm 土层平均容重和田间持水率分别为 1.43 g/cm³和 0.36 cm³/cm³。

1.2 试验设计

试验所用塑料大棚为钢架结构,采用无滴聚乙烯薄膜覆盖,东西方向长度为 20 m,南北方向宽度为 12 m,温室顶部和底部南北两侧均设有通风口,顶部通风口最大开度面积为 20 m²(20 m×1.0 m),底部单侧最大开度面积为 24 m²(20 m×1.2 m),在通风口位置安装有 60 目白色防虫网。2020 年所用塑料薄膜为旧膜(已使用 3 年),2021 年为新更换的塑料薄膜(2 月 10 日新更换),2 年所用塑料膜均为同一种材质。

为研究温室内外 ET_o变化,在温室内部和温室外部试验区域铺设多年生草坪,通过修剪,草坪高度始终保持在 0.12~0.15 m。温室内外草坪均采用微喷灌方式进行灌水,灌水时间设置在 20:00,灌水量为当日 20 cm 标准蒸发皿测量的水面蒸发量,温室内外日最大灌水量分别为 4.2、9.7 mm,采用上述灌溉制度,观测到试验期间 0~60 cm 土壤含水率为 0.29~0.36 cm³/cm³。为确保温室外牧草不受降雨影响,在降雨期间,采用塑料薄膜进行覆盖。为分析温室内外 ET_o平流分项的相关性,数据主要来源于 5 月和 6 月,即温室通风口处于完全开启状态(下雨天除外)。

1.3 观测项目与方法

1.3.1 温室内部与外部气象因子

试验期间连续测量了温室内部与外部空气温度(Air temperature, T_a)、相对湿度(Relative humidity, R_H)、太阳辐射(Solar radiation, R_s)和风速(Wind speed, V)。利用多套 HOBO 温湿度传感器(U23-002A 型,美国)测量 T_a 和 R_H ,温室内部监测 3 个位置,即东部、中部和西部,温室外部布设 1 套 HOBO, T_a 和 R_H 测量高度均为距地表 2 m 位置;利用测量的 T_a 和 R_H ,可计算出水汽压差(Vapour pressure deficit, VPD);利用 2 套规格相同的太阳辐射计(LI200X 型,美国)测量 R_s ,温室内部主要测量中间位置,室内与室外的辐射计均安装在距地表 2 m 位置;采用精度为 ±0.02 m/s 的风速计(Gill Wind Sonic 型,英国)测量温室内部与外部的 V ,传感器位置与 R_s 相同。所有气象数据每隔 5 s 采集 1 次,15 min 计算 1 次平均值, T_a 和 R_H 数据储存在 HOBO 中, R_s 和 V 存储在 CR1000 型数据采集器(Campbell Scientific Inc., 美国)中。

1.3.2 参考作物蒸发蒸腾量测量

温室内部安装有 2 台小型称重式蒸渗仪(LYS50S 型),长×宽×高为 50 cm×50 cm×60 cm,最大量程为 660 kg,蒸发量分辨率为 0.01 mm。蒸渗仪内部土壤剖面、牧草种植方式、修剪时间和灌水频率与外部一致,每隔 30 min 采集 1 次数据记录在数据采集器中。温室外部的 ET_o可采用 PM 公式计算获得。

1.4 模型构建及其参数确定

采用 PM 方程^[23]计算温室内部与外部的日尺度 ET_o,公式中的参数 T_a 、 VPD 和 V 选取室内和室外实测数据。在计算 ET_o时,对于日尺度一般认为土壤热通量(Soil heat flux, G)为 0,则 ET_o计算公式为

$$ET_o = \frac{0.408\Delta R_n + \gamma \frac{900}{T_a + 273} V \cdot VPD}{\Delta + \gamma(1 + 0.34V)} \tag{1}$$

其中

$$\begin{aligned} R_n &= R_{ns} - R_{nl} \\ R_{ns} &= (1 - \alpha) R_s \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} R_{nl} &= \sigma \frac{T_{\max,k}^4 + T_{\min,k}^4}{4} (0.34 - \\ &0.14 \sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \end{aligned} \tag{3}$$

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} Z) R_a \tag{4}$$

- 式中 Δ ——饱和水汽压曲线斜率, kPa/K
 γ ——湿度计常数, kPa/K
 R_n ——净辐射, MJ/(m²·d)
 R_{ns} ——净短波辐射^[23], MJ/(m²·d)
 R_{nl} ——净长波辐射^[23], MJ/(m²·d)
 α ——反射率,以牧草为参考作物时,取 0.23
 σ ——Stefan - Boltzmann 常数,取 4.903 × 10⁻⁹ MJ/(K⁴·m²·d)
 $T_{\max,k}$ ——最高绝对温度, K
 $T_{\min,k}$ ——最低绝对温度, K
 e_a ——实际水汽压, kPa
 R_{so} ——晴天太阳辐射, MJ/(m²·d)
 Z ——试验区海拔, m
 R_a ——天顶辐射, MJ/(m²·d), 可采用 FAO 56 手册中推荐公式进行计算

根据式(1),可将 ET_o分为辐射分量(ET_{o,rad})和平流分量(ET_{o,adv}),分别表示为

$$ET_{o,rad} = \frac{0.408\Delta R_n}{\Delta + \gamma(1 + 0.34V)} \tag{5}$$

$$ET_{o,adv} = \frac{\gamma \frac{900}{T_a + 273} V \cdot VPD}{\Delta + \gamma(1 + 0.34V)} \tag{6}$$

将温室内部 ET_o辐射分量衰减因子和平流分量

衰减因子分别定义为

$$\begin{cases} \zeta_{rad} = ET_{rad,in}/ET_{rad,out} \\ \zeta_{adv} = ET_{adv,in}/ET_{adv,out} \\ \zeta_o = ET_{o,in}/ET_{o,out} \end{cases} \quad (7)$$

式中 $ET_{rad,in}$ 、 $ET_{rad,out}$ ——温室内部、外部 ET_o 辐射分量,mm/d
 $ET_{adv,in}$ 、 $ET_{adv,out}$ ——温室内部、外部 ET_o 平流分量,mm/d
 $ET_{o,in}$ 、 $ET_{o,out}$ ——温室内部、外部 ET_o ,mm/d
 ζ_{rad} —— ET_o 辐射分量衰减因子
 ζ_{adv} —— ET_o 平流分量衰减因子
 ζ_o —— ET_o 总通量衰减因子

为实现利用室外气象信息估算室内 ET_o 的目标,引入太阳辐射透射率 τ 、风速衰减率 ω 以及 $ET_{rad,out}$ 和 $ET_{adv,out}$ 构建模型。此外,通过建立 ζ_{rad} 与 τ 的函数关系以及 ζ_{adv} 与 ω 的函数关系,得到 $ET_{o,in}$ 表达式为

$$ET_{o,in} = \zeta_{rad} ET_{rad,out} + \zeta_{adv} ET_{adv,out} = f(\tau) ET_{rad,out} + f(\omega) ET_{adv,out} \quad (8)$$

其中 $f(\tau) = 1.63\tau - 0.39 \quad (9)$

$$f(\omega) = 0.64\omega - 0.007 \quad (10)$$

式中函数 $f(\tau)$ 和 $f(\omega)$ 采用日尺度数据建立。以上数据均可由农业推广部门和气象服务部分提供,因此模型具有参数少易获取特点。

2 结果与分析

2.1 温室内外气象因子动态变化

本小节所分析的数据时间段为 2020、2021 年的 5 月 1 日—6 月 30 日,该时间段温室通风口处于长期开启状态,温室内外环境因子之间可以进行足够的质热交换,存在平流交换。

2.1.1 温室内外净辐射、净短波辐射和净长波辐射

图 1a~1c 分别为温室内外 R_{ns} 、 R_{nl} 和 R_n 随时间的动态变化曲线,表 1 为这 3 个辐射因子在 2020、2021 年月平均值和标准差。可以看出,受塑料膜的阻挡作用,室外 R_{ns} 、 R_{nl} 和 R_n 始终高于室内,为明确新旧塑料薄膜对 3 种辐射分量的影响,分别对 2 年辐射分量进行分析。2020 年室外和室内 R_{ns} 、 R_{nl} 和 R_n 波动区间分别为 1.14~20.66 MJ/(m²·d) 和 0.72~13.78 MJ/(m²·d),-0.87~3.24 MJ/(m²·d) 和 -0.78~1.39 MJ/(m²·d),2.01~17.87 MJ/(m²·d) 和 1.50~12.67 MJ/(m²·d), $R_{ns,in}/R_{ns,out}$ 、 $R_{nl,in}/R_{nl,out}$ 、 $R_{n,in}/R_{n,out}$ 平均值为 0.64、0.52 和 0.70。2021 年室外和室内 R_{ns} 、 R_{nl} 和 R_n 波动区间分别为 3.87~20.14 MJ/(m²·d) 和 1.27~13.96 MJ/(m²·d),

-0.36~3.24 MJ/(m²·d) 和 -0.57~1.32 MJ/(m²·d),4.23~16.90 MJ/(m²·d) 和 1.84~12.64 MJ/(m²·d), $R_{ns,in}/R_{ns,out}$ 、 $R_{nl,in}/R_{nl,out}$ 、 $R_{n,in}/R_{n,out}$ 平均值为 0.70、0.81 和 0.75。新膜下室内 R_{ns} 、 R_{nl} 和 R_n 较旧膜分别提升 11.1%、35.8% 和 10.3%,说明塑料薄膜的透过率显著影响了辐射各分量的变化。此外,为明确温室内外 R_{ns} 和 R_{nl} 占 R_n 的比例变化,将日尺度 R_{ns} 与 R_n 做线性拟合发现,二者之间存在显著的线性相关关系,在斜率为 1.0 条件下,决定系数 R^2 均大于 0.98, $R_{ns,out}/R_{n,out}$ 和 $R_{ns,in}/R_{n,in}$ 分别在 0.91~1.17 和 0.83~1.09 之间变化;2 个月平均 $R_{nl,in}/R_{n,in}$ 较 $R_{nl,out}/R_{n,out}$ 低 59.2%,说明温室塑料膜阻挡了净长波辐射的输出,使得室内 R_{nl} 损失权重相对较小。

2.1.2 温室内外空气温度、水汽压差和风速

图 1d~1f 分别为温室内外 T_a 、VPD 和 V 随时间的动态变化,表 1 为这 3 个气象因子在 2020、2021 年月平均值和标准差。可以看出,在整个试验观测期间,温室内外 T_a 差异较小,温差在 0.08~3.03℃ 之间变化,说明在温室通风口完全开启阶段,室内外 T_a 没有显著性差异;2 年整个试验观测期间,室外 VPD 明显高于室内,室外 VPD 在 0.35~3.34 kPa 之间变化,室内 VPD 在 0.03~2.00 kPa 之间变化,室外平均 VPD 较室内高 48.7%;受温室通风口的影响,室外风速始终高于室内,室外风速变幅较大,在 0.63~3.85 m/s 之间变化,而室内风速变化平稳,在 0.05~0.38 m/s 之间变化,平均风速相差 90.5%。试验观测期间,风速衰减率在 0.02~0.28 之间变化,平均值为 0.11。

2.2 温室内外参考作物蒸发蒸腾量及其各分量动态变化

图 2 为温室内外 ET_o 、 $ET_{o,rad}$ 和 $ET_{o,adv}$ 随时间的动态变化,表 2 为这 3 个因子在 2020、2021 年月平均值和标准差。可以看出, ET_o 随时间变化趋势与 R_n 和 R_{ns} 相似,室外 ET_o 在 0.88~9.75 mm/d 之间变化,平均值为 4.98 mm/d,室内 ET_o 在 0.40~4.05 mm/d 之间变化,平均值为 2.71 mm/d,5 月室内平均 ET_o 较室外减少 2.02 mm/d,6 月减少 2.55 mm/d,2 个月室内平均 ET_o 较室外减少 45.6%。

温室外部与内部 $ET_{o,rad}$ 变化趋势较接近,室外 $ET_{o,rad}$ 在 0.43~5.07 mm/d 之间变化,平均值为 3.20 mm/d,室内 $ET_{o,rad}$ 在 0.40~3.89 mm/d 之间变化,平均值为 2.59 mm/d,按月尺度计算,二者差值较小,5 月室内平均 $ET_{o,rad}$ 较室外仅减少 0.39 mm/d,6 月仅减少 0.84 mm/d,2 个月室内平均 $ET_{o,rad}$ 较室外减少 17.1%。温室内外 $ET_{o,adv}$ 随时间的变化趋势

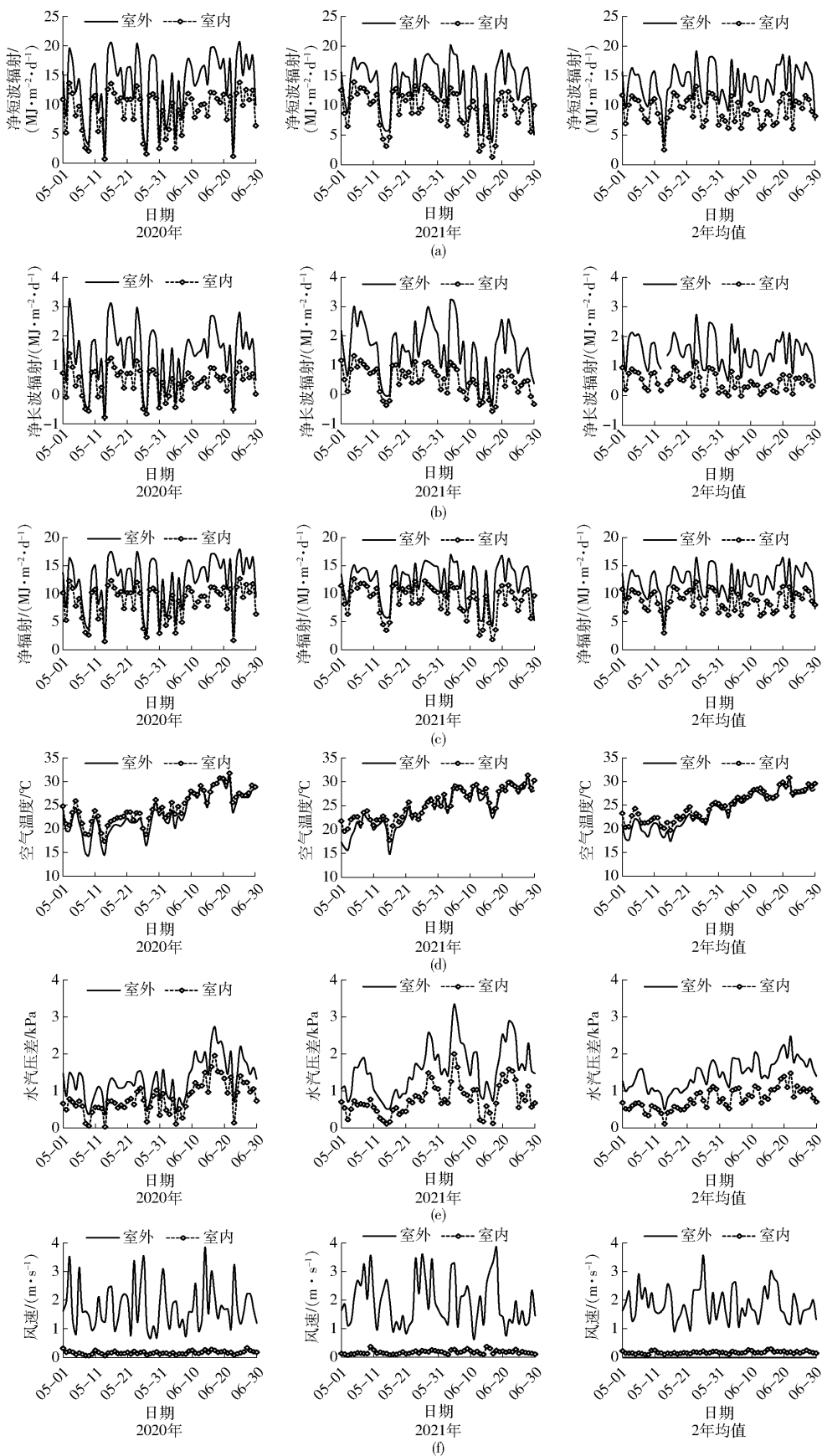


图 1 温室内部与外部气象因子动态变化曲线

Fig.1 Time evolution of mean daily value of meteorological factors inside and outside greenhouse

与 ET_0 和 $ET_{0,rad}$ 明显不同,但与风速变化趋势相似 (图 1f),且室外 $ET_{0,adv}$ 明显高于室内,室外 $ET_{0,adv}$ 在 0.45 ~ 5.76 mm/d 之间变化,平均值为 1.85 mm/d,室内 $ET_{0,adv}$ 在 0.01 ~ 0.37 mm/d 之间变化,平均值

表 1 温室内部与外部气象因子月均值和标准偏差

Tab.1 Monthly mean and standard deviation of meteorological factors inside and outside greenhouse

气象因子	月份	2020 年		2021 年	
		室内	室外	室内	室外
$R_{ns}/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})$	5	8.65 ± 3.96	12.98 ± 5.87	10.42 ± 2.86	14.29 ± 3.77
	6	9.27 ± 3.10	14.38 ± 4.75	8.44 ± 3.25	13.24 ± 4.83
$R_{nl}/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})$	5	0.42 ± 0.61	1.37 ± 1.16	0.68 ± 0.44	1.72 ± 0.85
	6	0.41 ± 0.40	1.39 ± 0.84	0.29 ± 0.42	1.31 ± 0.99
$R_n/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})$	5	8.23 ± 3.34	11.61 ± 4.73	9.74 ± 2.43	12.57 ± 2.96
	6	8.86 ± 2.71	13.00 ± 3.93	8.15 ± 2.85	11.92 ± 3.89
$T_a/^\circ\text{C}$	5	22.11 ± 2.12	20.37 ± 2.80	22.76 ± 1.96	21.38 ± 3.06
	6	27.09 ± 2.46	26.19 ± 3.01	27.92 ± 1.89	27.48 ± 2.13
VPD/kPa	5	0.60 ± 0.26	1.08 ± 0.35	0.64 ± 0.32	1.32 ± 0.54
	6	0.99 ± 0.46	1.57 ± 0.59	0.92 ± 0.45	1.87 ± 0.67
$V/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	5	0.15 ± 0.06	1.74 ± 0.84	0.17 ± 0.06	2.02 ± 0.85
	6	0.18 ± 0.06	1.79 ± 0.74	0.20 ± 0.07	1.85 ± 0.84

注:数据为月平均值±标准偏差,下同。

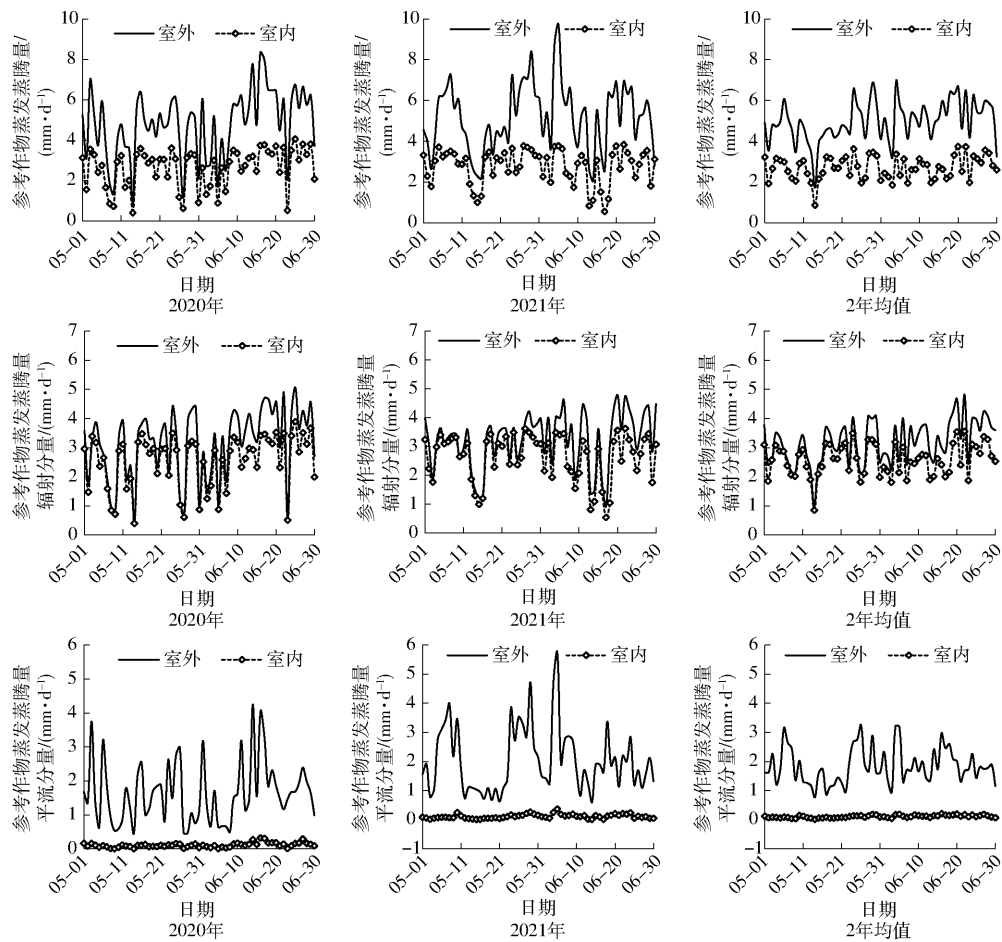


图 2 温室内部与外部参考作物蒸发蒸腾量及其分量变化曲线

Fig.2 Time evolution of reference evapotranspiration, radiative and advective component inside and outside greenhouse

为 0.11 mm/d,按月尺度计算,5 月室内平均 $ET_{o,adv}$ 较室外大幅减少 94.9%,6 月减少 93.1%。

辐射分量和平流分量对 ET_o 的贡献可分别表示为 $\rho_{rad} = ET_{o,rad}/ET_o$ 和 $\rho_{adv} = ET_{o,adv}/ET_o = 1 - \rho_{rad}$ 。在试验观测期间,室内 ρ_{rad} 始终高于室外,2020 年室内和室外平均 ρ_{rad} 分别为 0.96 和 0.65,2021 年分别

为 0.95 和 0.64,2 年平均 ρ_{rad} 室内较室外高 32.3%,说明在温室内太阳辐射对 ET_o 的影响高于室外。

2.3 参考作物蒸发蒸腾量辐射分量和平流分量分布及其与衰减因子相关性分析

图 3 为 ζ_{rad} 、 ζ_{adv} 和 ζ_o 随时间的动态变化,表 3 为这 3 个因子在 2020、2021 年月平均值、标准差和变

表 2 温室内部与外部参考作物蒸发蒸腾量及其分量月均值、标准偏差以及室内外差值

Tab. 2 Monthly mean and standard deviation of reference evapotranspiration, radiative and advective component inside and outside greenhouse and their differences							
mm/d							
气象因子	月份	2020 年			2021 年		
		室内	室外	室内外差值	室内	室外	室内外差值
ET_o	5	2.44 ± 1.00	4.32 ± 1.56	1.88 ± 0.76	2.90 ± 0.76	5.05 ± 1.64	2.15 ± 1.12
	6	2.85 ± 0.92	5.29 ± 1.72	2.44 ± 0.99	2.65 ± 0.95	5.30 ± 1.76	2.65 ± 1.30
$ET_{o,rad}$	5	2.36 ± 0.97	2.81 ± 1.23	0.45 ± 0.36	2.80 ± 0.73	3.01 ± 0.80	0.21 ± 0.29
	6	2.71 ± 0.86	3.50 ± 1.15	0.79 ± 0.34	2.52 ± 0.90	3.26 ± 1.15	0.74 ± 0.66
$ET_{o,adv}$	5	0.08 ± 0.05	1.52 ± 0.89	1.43 ± 0.86	0.10 ± 0.07	2.04 ± 1.19	1.94 ± 1.14
	6	0.13 ± 0.08	1.79 ± 0.97	1.66 ± 0.90	0.13 ± 0.08	2.03 ± 1.09	1.90 ± 1.03

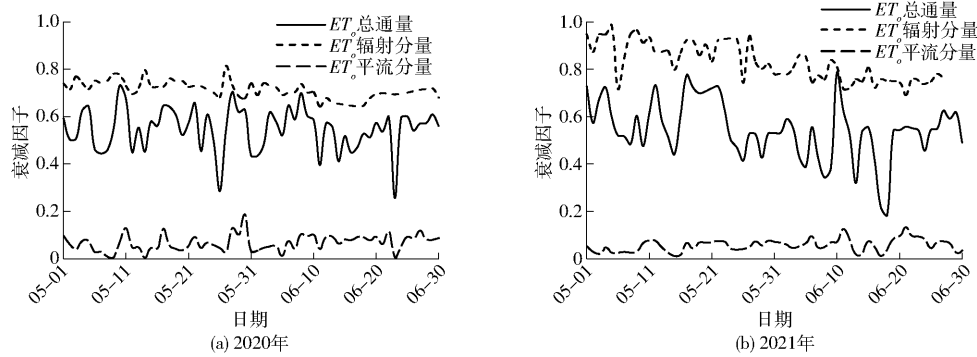


图 3 辐射分量、平流分量和总通量衰减系数变化曲线
Fig. 3 Time evolution of reduction factors total, radiative and advective component

表 3 辐射分量、平流分量和总通量衰减系数
月均值及变化区间

Tab. 3 Monthly mean value and variation interval of reduction factors total, radiative and advective component					
衰减因子	月份	2020 年		2021 年	
		月均值 ± 标准量	变化区间	月均值 ± 标准量	变化区间
ζ_o	5	0.56 ± 0.10	[0.29, 0.73]	0.59 ± 0.11	[0.41, 0.78]
	6	0.54 ± 0.09	[0.26, 0.70]	0.51 ± 0.17	[0.18, 0.12]
ζ_{rad}	5	0.74 ± 0.03	[0.68, 0.81]	0.88 ± 0.07	[0.72, 0.96]
	6	0.69 ± 0.03	[0.64, 0.74]	0.77 ± 0.07	[0.69, 0.86]
ζ_{adv}	5	0.06 ± 0.04	[0.01, 0.19]	0.05 ± 0.02	[0.01, 0.08]
	6	0.07 ± 0.03	[0.01, 0.12]	0.06 ± 0.03	[0.01, 0.13]

化区间。可以看出,在试验观测期间衰减因子总体上表现为: $\zeta_{rad} > \zeta_o > \zeta_{adv}$,2020 年 ζ_{rad} 在 0.64 ~ 0.81 之间波动,平均值为 0.72, ζ_o 在 0.26 ~ 0.73 之间波动,平均值为 0.55, ζ_{adv} 在 0.01 ~ 0.19 之间波动,平均值为 0.06, ζ_{rad} 平均值较 ζ_o 和 ζ_{adv} 高 23.1% 和 90.1%。2021 年 ζ_{rad} 在 0.69 ~ 0.96 之间波动,平均值为 0.83, ζ_o 在 0.18 ~ 0.78 之间波动,平均值为 0.55, ζ_{adv} 在 0.01 ~ 0.13 之间波动,平均值为 0.06, ζ_{rad} 平均值较 ζ_o 和 ζ_{adv} 高 33.3% 和 93.3%。2021 年 ζ_{rad} 明显高于 2020 年,这是由于 2021 年新更换了塑料薄膜,辐射透过率较高导致的,而 ζ_o 和 ζ_{adv} 在 2 年的变化相差不大。

为了对模型参数进行求解,同时验证模型的适用性,将数据分为模型求解和模拟验证 2 个数据集,利用 2020、2021 年 5 月数据进行参数求解,利用 6 月数据对模型进行验证。通过汇总 2 年 5 月的数据 ($n = 62$),建立了温室通风期间 ζ_{rad} 与 τ 以及 ζ_{adv} 与 ω 之间的关系(图 4)。可以看出两因子间存在极显著线性关系($P < 0.01$), ζ_{rad} 与 τ 间 R^2 为 0.74,平均绝对误差 (MAE) 和均方根误差 (RMSE) 分别为 0.07 和 0.09; ζ_{adv} 与 ω 间 R^2 为 0.90,MAE 和 RMSE 分别为 0.04 和 0.05。

2.4 基于室外气象信息估算室内参考作物蒸发蒸腾量模型构建与评价

将构建的 ζ_{rad} 与 τ 以及 ζ_{adv} 与 ω 关系式代入式(8),同时将 $ET_{rad,out}$ 和 $ET_{adv,out}$ 表达式代入式(8),得到温室通风期间利用室外气象信息估算室内 ET_o 计算公式为

$$ET_{o,in} = \frac{1}{\Delta + \gamma(1 + 0.34V_{out})} \left[0.16\Delta R_{n,out}(4.2\tau - 1) + \frac{576\gamma V_{out} VPD_{out} \omega}{T_{a,out} + 273} \right] \quad (11)$$

式中下角 in 表示室内,out 表示室外。

将室外气象数据 T_a 、 R_H 和 V 代入式(11)计算出室内 ET_o ,同时将计算的 $ET_{o,in}$ 与室内观测值进行线性拟合(图 5),可以看出大部分数据点围绕在 1:1 线附近,二者呈极显著性关系($P < 0.01$), R^2 为

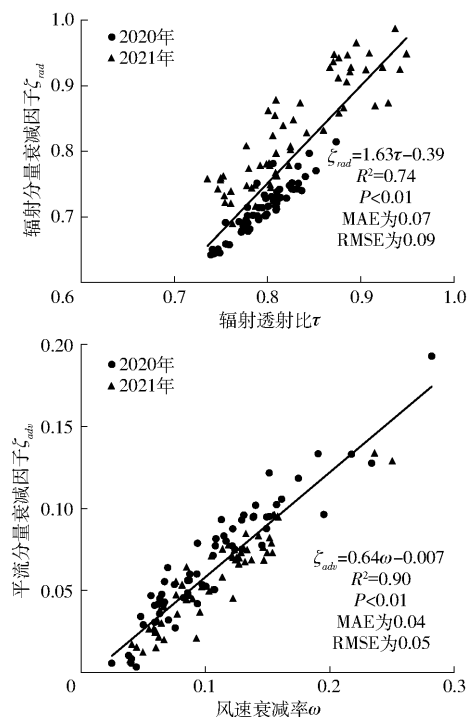


图4 通风口开启条件下辐射分量、平流分量衰减因子与传输系数相关性

Fig.4 Relationship between radiative reduction factor and radiation transmittance, advective reduction factor and wind ratio during vents opening

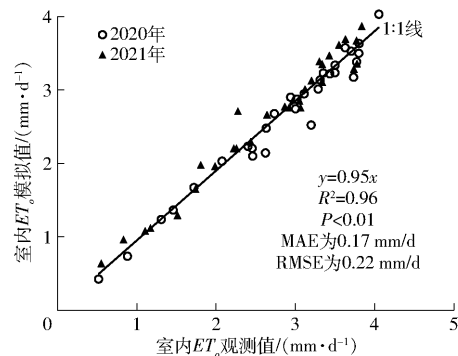


图5 温室内参考作物蒸发蒸腾量观测值与模拟值相关性

Fig.5 Relationship between daily observed and estimated values of inside reference evapotranspiration

0.96,MAE 和 RMSE 分别为 0.17、0.22 mm/d,可见模型具有较高的模拟精度和稳健性。

3 讨论

温室内 ET_0 测量值通常采用蒸渗仪称量获取^[24],但要求牧草高度为 0.12 m,完全覆盖地面且不缺水,本研究通过修剪管理,草坪高度始终保持在 0.12~0.15 m 范围内,采用的微喷灌灌水方式保持 0~60 cm 土壤含水率为 0.29~0.36 cm³/cm³,因此,本研究对 ET_0 的测量满足条件。在温室栽培条件下,由于塑料薄膜的存在改变了 ET_0 的两个主要驱动因素:净太阳辐射和气流运动速度,前者主要表现

为覆盖对净短波辐射和净长波辐射的影响,后者主要表现为通风口的限制效应。这一结论在文献[15,17]中也得到证实,因此温室环境下的辐射交换过程和平流交换过程对 ET_0 的影响是讨论的重点。

3.1 温室内外辐射传输及其分量变化

计算温室内部的 ET_0 首先要准确获取室内净辐射 $R_{n,in}$, R_n 是 R_{ns} 与 R_{nl} 的差值,温室内部 R_{ns} 可表示为

$$R_{ns,in} = (1 - \alpha) R_{s,in} = 0.77 R_{s,in} = 0.77 \tau R_{s,out} \quad (12)$$

表明 $R_{ns,in}$ 与 $R_{s,out}$ 比例为 0.77 τ ,如果 τ 已知,则 $R_{ns,in}$ 可直接用室外太阳辐射进行推导,本研究将 $R_{ns,in}$ 与 $R_{s,out}$ 进行线性拟合发现二者呈显著线性关系(图6), R^2 为 0.95,说明利用室外 R_s 估算室内 R_{ns} 可行。

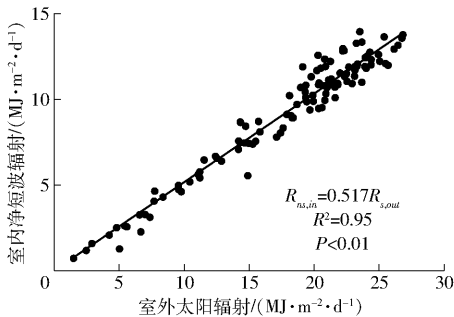


图6 温室内净短波辐射与室外太阳辐射相关性

Fig.6 Relationship between net short wave radiation of inside and solar radiation of outside

此外,试验期间平均室内 R_{ns} 较室外 R_s 减少 67%,接近于 R_n 的衰减比例(70%),说明温室塑料薄膜覆盖对净辐射和净短波辐射的衰减率相近,这在文献[17]中也得到证实。温室结构和覆盖材料是影响室内太阳辐射的重要因子,如王静等^[25]分析了单斜面、抛物面和圆-抛物面3种结构类型日光温室内不同点位的辐射量和透光率,证明了温室结构对室内辐射量和透射率的影响;DENG 等^[26]证实了PVC膜对温室内太阳辐射和透射率的影响效应,并提出了太阳辐射利用效率概念来解释室内水平太阳辐射在跨度和长度方向上的分布差异。可见,覆盖材料类型和温室结构特点均会影响太阳辐射透射率。另一方面,室内的 R_{nl} 相较于室外损失明显降低,在试验观察期间,2020、2021 年 R_{nl} 平均损失量分别为 0.97、1.05 MJ/(m²·d),即在温室内部观测到 R_{nl} 数值越小,意味着 R_n 越大,换算为水分损失量分别为 0.39、0.43 mm/d。KITTA 等^[17]发现对于不同类型防虫网来说, R_{nl} 损失量在 0.70~1.05 mm/d 之间变化。可见, R_{nl} 损失量受覆盖材料类型的影响较大,这方面损失量同样值得关注。

上述提到的 R_{ns} 和 R_{nl} 在室内外的差异,以及对 R_n 的影响均会对 $ET_{o,rad}$ 产生直接影响,试验观测期间 $ET_{o,rad}$ 对 ET_o 的贡献始终表现为室内高于室外,其主要原因是室内 $ET_{o,adv}$ 较室外大幅降低,导致室内 ET_o 显著下降造成的。在辐射分量衰减方面,试验发现温室内外 R_n 比值在 0.64 ~ 0.77 之间变化,平均值为 0.71,温室内外 $ET_{o,rad}$ 比值在 0.64 ~ 0.96 之间变化,平均值为 0.78 (图 3),说明辐射分量衰减因子 ζ_{rad} 与 τ 并不成正比,通过分析二者的相关性发现, τ 较 ζ_{rad} 显著偏移了 0.29,并且斜率接近 1.5 (图 4)。

3.2 温室内外平流传输及其分量变化

有研究发现,温室通风口通风量和室外风速是影响风速衰减率的重要因子^[27],本研究所采用的温室通风口分别位于底部南北两侧和顶部位置,底部单侧通风口面积为 24 m²,顶部为 20 m²,室外风量主要从底部流入,从顶部流出,因此可认为温室通风口面积为 2 × 24 m²。试验期间,室外风速在 0.63 ~ 3.85 m/s 之间变化,平均值为 1.85 m/s,根据 BOULARD 等^[28]提出的通风量估算模型,在本试验条件下,室内通风量在 0.46 ~ 1.45 m³/s 之间,平均值为 0.85 m³/s。试验期间,风速衰减率在 0.02 ~ 0.28 之间,风速衰减率与室外风速 ($R^2 = 0.36, P < 0.01, n = 122$) 和通风量 ($R^2 = 0.14, P < 0.01, n = 122$) 之间均表现为显著性幂函数关系 (图 7),但函数只能解释总偏差的 36% 和 14%,这表明自然通风下风速衰减率受到室外风速和通风量的显著影响,但构建二者之间的估算模型可能更多地需要考虑室外风速大小和方向、通风口位置和开度的综合影响。研究发现外部风向角度与室内风速密切相关^[29],室外风向可以改变室内气流场的分布进而影响不同区域作物蒸腾量^[30]。目前关于外部风向对通风率的影响研究多是利用 CFD 计算流体力学仿真软件进行,如 TEITEL 等^[31]利用 CFD 技术研究了外部风向对自然通风温室结构通风率的影响,并认为外部风向会显著改变室内空气流速和流向;何科爽等^[32]认为温室内的微气候场和气流场主要受室外风速和风向的影响,而通风率受室外风速影响较大。本研究主要是基于试验实测数据构建的模型,未充分考虑室外风速和风向变化对模型的影响,因此未来研究可借助 CFD 仿真软件,通过设置外部不同风速和风向条件进一步拓展模型应用范围。

温室内外 ET_o 平流分量主要受风速影响,且室内外 $ET_{o,adv}$ 变化趋势与风速变化相似。试验观测期间,室外风速远高于室内,因此 $ET_{o,adv}$ 同样表现为室外高于室内的变化趋势,导致试验期间 ζ_{adv} 在

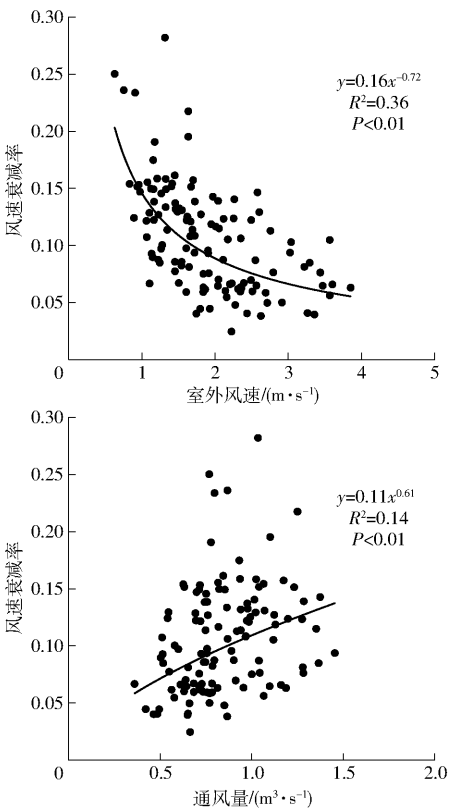


图 7 风速衰减率与室外风速、通风量间关系

Fig. 7 Relationship between wind speed reduction rate and external wind speed, ventilation flux

0.2 以下波动,平均值仅为 0.06,远低于 ζ_{adv} 和 ζ_o 。由于平流分量与风速密切相关,因此估算平流分量时需首先考虑风速衰减率 ω 自变量,本研究发现 ω 较 ζ_{adv} 仅偏移了 0.007 (可忽略不计),但斜率为 0.64,产生低估的原因可能是平流分量除受到风速显著影响外,还同时受到 T_a 和 VPD 的影响,虽然温室内外 T_a 比较接近 (最大相对偏差仅为 14.2%),但温室内外 VPD 差异较大,最大相对偏差达到 78.2%。BOULARD 等^[15]研究也发现,温室内部作物耗水规律与植株叶片周围的水汽压差有密切联系,水汽压亏缺程度又直接受到室外饱和和亏缺程度的影响。

3.3 模型评价与应用

目前,利用温室外部气象数据计算室内作物需水量的相关模型较少,主要原因是温室通风方式差异导致的参数估计偏差,以及能量转化的损失。如 BOULARD 等^[15]在很早之前就开发了利用室外气象数据估算室内番茄植株蒸腾量模型,该模型以能量平衡为理论基础,同时引入 PM 方程推导了蒸腾量计算模型,模型具有以下特征:①模型参数较多,增加了模型应用的不确定性。②在不同通风状况下,模型精度差异大,如通风口处于开启状态时,实测值较模拟值偏差 7.64 W/m² ($R^2 = 0.97$),通风口关闭时,实测值较模拟值偏差 14.27 W/m² ($R^2 = 0.89$)。

本研究建立的模型主要涉及室外净辐射、空气温度、水汽压差和风速 4 个气象因子以及 τ 、 ω 2 个温室特征因子,模型结构简单,所需数据较少且易获取,同时模型精度稳健,通过与 2 年试验数据对比,在保持斜率为 1.0 的情况下, R^2 达 0.96, MAE 和 RMSE 仅分别为 0.17、0.22 mm/d。

由于模型所需的气象数据可通过农业部门或气象部门提供,因此辐射透射率 τ 和风速衰减率 ω 成为影响模型精度的 2 个关键因子, τ 和 ω 分别决定了辐射分量和平流分量在 ET_o 中的比例,因此需对 τ 和 ω 进行可靠的计算或测量。本研究构建的模型是在温室通风口完全开启状态下建立的,当通风口关闭时,温室内部风速极低(风速接近零),利用式(6)计算平流分量时亦接近零,导致模型精度降低 3.8%~4.9%,该情况本研究未予以考虑(对于春茬番茄,通风口关闭情况主要发生在夜间以及 5 月之前)。

4 结论

(1)参考作物蒸发蒸腾量辐射分量和平流分量分别与净辐射和风速密切相关,在 2 年试验观测期内,温室内部净辐射较室外降低 28.8%,导致参考

作物蒸发蒸腾量辐射分量室内较室外降低 17.1%; 2 年温室内部风速显著低于室外,降幅为 90.5%,导致参考作物蒸发蒸腾量平流分量室内较室外降低 94.0%;温室内部和外部 ET_o 分别在 0.40~4.05 mm/d 和 0.88~9.75 mm/d 之间波动,室内平均 ET_o 较室外减少 45.6%。

(2)温室内部参考作物蒸发蒸腾量及其辐射和平流分量较室外均有衰减,但衰减程度不同,表现为 $\zeta_{rad} > \zeta_o > \zeta_{adv}$ 趋势, ζ_o 和 ζ_{adv} 在 2 年表现出一致性,均值分别为 0.55 和 0.06,但 ζ_{rad} 在 2 年表现出差异性,均值分别为 0.72 和 0.83,说明塑料薄膜透光率对 ET_o 辐射分量衰减的影响较大。通过进一步分析 ET_o 辐射分量衰减因子与辐射透射比以及 ET_o 平流分量衰减因子与风速衰减率之间的关系,发现两者间均存在极显著线性关系,为构建基于室外气象信息计算室内 ET_o 模型提供了重要支撑。

(3)通过引入辐射透射率和风速衰减率 2 个特征因子,构建了基于室外气象信息计算室内 ET_o 模型,该模型仅包括室外净辐射、空气温度、水汽压差和风速 4 个气象因子,模型结构简单且稳健性好, R^2 达到 0.96, MAE 和 RMSE 仅分别为 0.17、0.22 mm/d,该模型具有一定应用价值。

参 考 文 献

- [1] 李天来, 许勇, 张金霞. 我国设施蔬菜、西甜瓜和食用菌产业发展的现状及趋势[J]. 中国蔬菜, 2019(11): 6-9.
LI Tianlai, XU Yong, ZHANG Jinxia. The current situation and trend of the development of facility vegetable, sweet melon and edible mushroom industries in China[J]. China Vegetables, 2019(11): 6-9. (in Chinese)
- [2] 毛罕平, 晋春, 陈勇. 温室环境控制方法研究进展分析与展望[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 1-13.
MAO Hanping, JIN Chun, CHEN Yong. Research progress and prospect on control method of greenhouse environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 1-13. (in Chinese)
- [3] JOLLIET O, BAILEY B J. The effects of climate on tomato transpiration in greenhouses: measurements and models comparison[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1992, 58: 43-62.
- [4] YANG X, SHORT T, FOX R, et al. Leaf temperature and stomatal resistance of greenhouse cucumber crop[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1990, 5: 197-209.
- [5] STANGHELLINI C. Transpiration of solar greenhouse crops: an aid to climate management[D]. Wageningen: Wageningen Agricultural University, 1987.
- [6] YAN H F, DENG S S, ZHANG C, et al. Determination of energy partition of a cucumber grown Venlo-type greenhouse in southeast China[J]. Agricultural Water Management, 2023, 276: 108047.
- [7] 傅理, 张亚红, 白青. 日光温室内外环境特征及其变化规律[J]. 黑龙江生态工程职业学院学报, 2009, 22(4): 62-65.
FU Li, ZHANG Yahong, BAI Qing. Environmental characteristics and variation patterns inside and outside the solar greenhouse[J]. Journal of Heilongjiang Vocational Institute of Ecological Engineering, 2009, 22(4): 62-65. (in Chinese)
- [8] 刘可群, 黎明锋, 杨文刚. 大棚小气候特征及其与大气气候的关系[J]. 气象, 2008, 34(7): 101-107.
LIU Kequn, LI Mingfeng, YANG Wen'gang. Characteristics of microclimate in greenhouse and its relationship with major climate[J]. Agrometeorology, 2008, 34(7): 101-107. (in Chinese)
- [9] 魏瑞江, 王西平, 常桂荣, 等. 连阴天气塑料日光温室内外温度的关系及调控[J]. 中国农业气象, 2001, 22(3): 24-27.
WEI Ruijiang, WANG Xiping, CHANG Guirong, et al. The air temperature variation inside greenhouse related to the outside temperature in continuous cloudy-weather and its regulation[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2001, 22(3): 24-27. (in Chinese)
- [10] PEREIRA L S, ALLEN R G, SMITH M, et al. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: past and future[J]. Agricultural Water Management, 2015, 147: 4-20.
- [11] GONG X W, LIU H, SUN J S, et al. A proposed surface resistance model for the Penman-Monteith formula to estimate

- evapotranspiration in a solar greenhouse[J]. *Journal of Arid Land*, 2017, 9(4): 530 – 546.
- [12] QIU R J, KANG S Z, DU T S, et al. Effect of convection on the Penman – Monteith model estimates of transpiration of hot pepper grown in solar greenhouse[J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, 160(3): 163 – 171.
- [13] 刘浩, 段爱旺, 孙景生, 等. 基于 Penman – Monteith 方程的日光温室番茄蒸腾量估算模型[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(9): 208 – 213.
- LIU Hao, DUAN Aiwang, SUN Jingsheng, et al. Estimating model of transpiration for greenhouse tomato based on Penman – Monteith equation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(9): 208 – 213. (in Chinese)
- [14] 汪小岳, 罗卫红, 丁为民, 等. 南方现代化温室黄瓜夏季蒸腾研究[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(11): 1390 – 1395.
- WANG Xiaochan, LUO Weihong, DING Weimin, et al. Cucumber canopy transpiration in subtropical modern greenhouse under summer climate condition[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(11): 1390 – 1395. (in Chinese)
- [15] BOULARD T, WANG S. Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 100: 25 – 34.
- [16] JEMAA R, BOULARD T, BAILLE A. Apport des modeles de transpiration d'une culture de tomate sous serre au pilotage de l'irrigation[J]. *Ciheam-Options Mediterraneennes*, 1999, 31: 203 – 214.
- [17] KITTA E, BAILLE A, KATSOULAS N, et al. Predicting reference evapotranspiration for screenhouse-grown crops[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 143: 122 – 130.
- [18] SAADON T, LAZAROVITCH N, JERSZURKI D, et al. Predicting net radiation in naturally ventilated greenhouses based on outside global solar radiation for reference evapotranspiration estimation[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 257: 107102.
- [19] PAPADAKIS G, FRANGOUDAKIS A, KIRITSIS S. Experimental investigation and modelling of heat and mass transfer between a tomato crop and the greenhouse environment[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1994, 57: 217 – 227.
- [20] BOULARD T, BAILLE A, MERMIER M, et al. Mesures et modélisation de la résistance stomatique foliaire et de la transpiration d'un couvert de tomate de serre[J]. *Agronomie*, 1991, 11: 259 – 274.
- [21] PIRKNER M, DICKEN U, TANNY J. Penman – Monteith approaches for estimating crop evapotranspiration in screenhouses—a case study with table-grape[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2014, 58(5): 725 – 737.
- [22] DICKEN U, COHEN S, TANNY J. Effect of plant development on turbulent fluxes of a screenhouse banana plantation[J]. *Irrigation Science*, 2013, 31(4): 701 – 713.
- [23] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome: Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, 1998.
- [24] FERNANDEZ M D, BONACHELA S, ORGAZ F, et al. Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate[J]. *Irrigation Science*, 2010, 28: 497 – 509.
- [25] 王静, 崔庆法, 林茂兹. 不同结构日光温室光环境及补光研究[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(4): 86 – 89.
- WANG Jing, CUI Qingfa, LIN Maozi. Illumination environment of different structural solar greenhouse and their supplement illumination[J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(4): 86 – 89. (in Chinese)
- [26] DENG L H, LI A G, CHE J G. Distribution and optimization of solar radiation in a solar greenhouse under the influence of wall shading[J]. *Solar Energy*, 2024, 284: 113034.
- [27] KITTAS C, DRAOUI B, BOULARD T. Quantification of the ventilation of a greenhouse with a roof opening[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 77: 95 – 111.
- [28] BOULARD T, BAILLE A. Modelling of air exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1995, 61(1): 37 – 47.
- [29] 孙怀卫, 杨金忠, 王修贵. 塑料大棚气流场模拟及作物蒸腾量计算[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(11): 236 – 241.
- SUN Huaiwei, YANG Jinzhong, WANG Xiugui. Numerical simulation of airflow pattern and calculation of crop transpiration in plastic greenhouse[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(4): 236 – 241. (in Chinese)
- [30] 万敏, 杨魏, 刘竹清, 等. 不同通风方式日光温室微环境模拟与作物蒸腾研究[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(1): 328 – 349.
- WAN Min, YANG Wei, LIU Zhuqing, et al. Microenvironment simulation and crop transpiration analysis of solar greenhouse with different ventilation modes[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(1): 328 – 349. (in Chinese)
- [31] TEITEL M, ZISKIND G, LIRAN O, et al. Effect of wind direction on greenhouse ventilation rate, airflow patterns and temperature distributions[J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 101(3): 351 – 369.
- [32] 何科爽, 陈大跃, 孙丽娟, 等. 不同风况和开窗配置对夏季单栋塑料温室微气候的影响[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(12): 311 – 339.
- HE Keshi, CHEN Dayue, SUN Lijuan, et al. Effects of wind regime and vent configuration on microclimate in tunnel greenhouses in summer[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(12): 311 – 339. (in Chinese)