

李永秀, 番聪聪, 宋文怀. 不同方法测定设施番茄蒸腾的结果比较及相关性分析[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(3): 98–101.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.03.027

不同方法测定设施番茄蒸腾的结果比较及相关性分析

李永秀, 番聪聪, 宋文怀

(南京信息工程大学应用气象学院/江苏省农业气象重点实验室, 江苏南京 210044)

摘要:以番茄品种金粉 5 号为试材, 同步采用称质量法、微气象法及茎流仪法对设施番茄蒸腾速率进行测定, 对不同方法的测定结果进行比较, 并分析称质量法与微气象法、称质量法与茎流仪法之间的相关关系。结果表明, 3 种方法测得的设施番茄蒸腾速率日变化趋势基本一致, 微气象法和称质量法的测量结果比较接近, 而茎流仪法的测量结果大于其他 2 种方法; 以称质量法测量结果为对照, 微气象法和茎流仪法测得的设施番茄日总蒸腾量分别偏高 25% 和 71%。称质量法(y)与微气象法(x_1)、茎流仪法(x_2)测量的设施番茄蒸腾速率均存在显著的线性相关关系, 表达式分别为 $y = 0.79x_1 + 0.05$, $r = 0.93$; $y = 0.66x_2 - 1.18$, $r = 0.84$ 。因此, 微气象法和茎流仪法的测量结果可通过称质量法进行订正, 从而获得较为准确的设施番茄蒸腾速率连续观测数据。

关键词: 蒸腾; 称质量法; 微气象法; 茎流仪; Penman – Monteith 模型

中图分类号: S641.201 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)03-0098-04

土壤、植物和大气之间的巨大水势差和毛管力引起水分从根部流向叶片, 同时携带养分到达叶片和活跃细胞。由根系进入植物体的水分只有 1% 保留在植物体内, 参与生理过程, 其他 99% 的水分通过蒸腾消耗掉^[1]。蒸腾决定叶片中的水势、气象参数(风、辐射、湿度和温度)以及土壤湿度(土壤水势), 不仅对作物生长发育至关重要, 而且决定着农田边界层的状况, 因此测量蒸腾是理解和调节植物水分关系的关键技术^[2-3]。设施作物生产在半封闭的空间内进行, 导致设施作物蒸腾对设施小气候的影响比大田生产更加显著, 设施作物蒸腾是设施内空气及作物能量与水分平衡中非常重要的一项, 直接影响到设施内的温度和湿度状况。因此, 蒸腾不仅是作物本

身的生理指标, 还是综合了作物和环境的重要生态指标^[4-6]。

作物蒸腾的测定方法较多, 从冠层水平考虑有水量平衡法、微气象法(包括波文比能量平衡法、空气动力学法、能量平衡-空气动力学综合法及涡度相关法等)、红外遥感法; 从个体水平考虑有茎流计法、同位素示踪法、风调室法、盆栽称质量法、整树容器法和蒸渗仪法; 从叶片水平考虑有光合仪法、气孔计法、剪枝称质量法等^[7-8]。其中, 盆栽称质量法对设备要求低, 简便易行且较为准确, 对大田作物和树木, 该方法存在样本所处群体状态与实际不相符只能用于小苗测量的缺陷, 然而对常采用行栽或盆栽的设施作物, 该方法具有很强的适用性, 但只能进行间断测定, 数据的连续性差, 因此常用质量法对其他测量方法进行评价和校正。微气象法根据能量平衡原理, 通过对气象资料的分析直接或间接计算植被冠层的蒸腾耗水量, 避免了由个体尺度上升到群体尺度时可能面临的难点和误差, 适用于大面积作物蒸腾量的估算; 但该方法假定空气动量、能量和水气湍流扩散系数相等, 即在中性层结大气条件下才能获得较为准确的结果, 而在非中性层结条件下要对参数进行相应调整, 运算的复杂性将大大增加。用茎

收稿日期: 2015-12-17

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41275117); 南京信息工程大学大气科学与环境气象实验实习教材建设项目(编号: SXJC2014B05)。

作者简介: 李永秀(1979—), 女, 甘肃武威人, 硕士, 高级实验师, 主要研究方向为农业气象。Tel: (025) 58731194; E-mail: lyxsha@nuist.edu.cn。

时期, 养分释放能够满足时研坐果的需求, 为提高产量提供重要的保障。在本研究中, 通过对对比普通化肥和不同配比的控释掺混肥对时研生长特性、产量和品质的影响, 发现减氮 30% 的控释掺混肥(T6)和减量 20% 的控释掺混肥(T4)均能够提高时研的产量和品质, 且氮的利用率较高, 各个指标都具有良好的表现。可见, 控释肥能够提高氮的活性和化肥的利用效率, 给时研提供稳定持续的养分。

参考文献:

- [1] 郭小鹏, 张一鸣, 邹春娇, 等. 施用不同物料对温室连作番茄产量和品质的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2013, 44(5): 590–593.
- [2] 罗勤, 陈竹君, 闫波, 等. 水肥减量对日光温室土壤水分状况

及番茄产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2015, 21(2): 449–457.

- [3] 张林青. 水杨酸对盐胁迫下番茄产量和品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(5): 103–105.
- [4] 黄思杰, 丸尾达, 高垣美智子, 等. 植物工厂条件下不同基质对番茄产量和品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(7): 129–132.
- [5] 卢艳阳, 张又弛, 孙健, 等. 城市餐厨垃圾厌氧消化液对番茄产量和品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2014, 31(18): 5785–5786, 5791.
- [6] 虞娜, 张玉龙, 张玉玲, 等. 灌溉和施肥对温室番茄产量和品质影响效应的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2009, 32(4): 31–35.
- [7] 史晋鹏, 刘明池, 季延海, 等. 不同供液频率对基质槽培番茄产量和品质的影响[J]. 新疆农业科学, 2014, 51(6): 1058–1063.

流计法测定作物蒸腾不会对植株造成损伤,植物体可以在自然环境条件下生长,能够实现长期连续测定,仪器易于野外操作,可远程下载数据,适用于单株植物整体蒸腾量的观测,单位面积的蒸腾总量由单株蒸腾乘以种植密度求得,可以避免由单个叶片换算田间总蒸腾时涉及到的叶面积指数以及冠层上下叶位差异等不确定因素,因而茎流计在植物蒸腾相关的应用中应用越来越广泛,近 10 年来,有关树木蒸腾的文献中,有半数以上是应用茎流仪法进行测定研究的^[9-10]。然而,茎流计在设施作物蒸腾研究中的应用较为少见,对其测量的准确性也缺乏可靠的试验验证,为此本研究同步采用盆栽称质量法、微气象法、茎流仪法对设施番茄蒸腾量进行测量或计算,通过比较,分析茎流仪法和微气象法测定设施番茄蒸腾量的准确性与可行性,为设施番茄蒸腾的连续测量及研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验基本情况

试验于 2014 年 5 月的 2 个典型晴天(5 月 13 日和 5 月 15 日)在南京信息工程大学试验温室(Venlo 型)内进行,温室顶高 5.0 m,肩高 4.5 m,宽 9.6 m,长 30.0 m。以番茄品种金粉 5 号为试验材料,于 2014 年 3 月 13 日播种,4 月 3 日移栽至直径 30 cm、高 21 cm 的钵钵内,种植密度为 2.5 株/m²。蒸腾试验期间,番茄正处于结果期。试验期间,每天晚上观测结束后根据需要进行灌溉,保证在次日早上开始观测前钵钵内没有水渗漏,土壤水肥均控制在适宜水平,钵内土壤用保鲜膜覆盖,防止土壤蒸发。

温室内外均安装有空气温湿度传感器(HMP45D,维萨拉公司,芬兰),室外装有风速传感器(034B, MetOne 公司,美国),温室内有净辐射传感器(CNR4, Kipp & Zonen, 荷兰)、光合有效辐射传感器(LI-190SA, LI-COR Biosciences 公司, 美国),所有传感器观测数据由数据采集器(CR3000, Campbell Scientific 公司, 美国)采集、处理并存储,采集频率为每 10 s 1 次,存储每 1 h 的平均值。叶面积指数(leaf area index, 简称 LAI)由叶面积仪(LI-3000C, LI-COR Biosciences 公司, 美国)测量。

1.2 测量与计算方法

1.2.1 称质量法 用电子天平(10 kg, 0.1 g)从 07:00 到 19:00, 1 次/h,称盆栽番茄质量,2 次称量之间的质量差即为该时段内的蒸腾量,每次称量 3 盆,蒸腾量取 3 盆的平均值。每次称量时,将供试植株从群体中搬出,称量结束后放回原地,以保证供试植株所处环境与群体一致。

1.2.2 微气象法 微气象法中,波文比能量平衡法、空气动力学法、涡度相关法等,均需要下垫面均匀一致,有较大的风浪区,这些条件在设施环境下均很难满足,因此实际应用最多的是能量平衡-空气动力学综合法,基于此方法建立的蒸腾模型较多,其中最具代表性的是 Monteith 于 1965 年在 Penman 等工作基础上提出了计算作物蒸发蒸腾的模型,即 Penman-Monteith 模型^[10]。该模型以能量平衡和水汽扩散为基础,既考虑空气动力学和辐射项的作用,又涉及作物的生理特征,具有充分的理论依据和较高的计算精度。P-M 模型的表达式如下^[4,6]:

$$\lambda E = \frac{\Delta R'_n + 2LAI(\rho C_p/r_a)(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma[1 + (r_c/r_a)]}; \quad (1)$$

$$R'_n = R_n[1 - \exp(-k \times LAI)]; \quad (2)$$

$$e_s = 0.6107 \times \exp[17.4T_a/(239 + T_a)]; \quad (3)$$

$$e_a = e_s \times RH; \quad (4)$$

$$\Delta = \frac{4158.6e_s(T_a)}{(T_a + 239)^2}; \quad (5)$$

$$r_a = 220d^{0.2}/u^{0.8}; \quad (6)$$

$$u = G/A_c; \quad (7)$$

$$r_c = 200\{1 + 1/\exp[0.05(R_n - 50)]\}。 \quad (8)$$

式中: λ 为水的蒸发潜热,2450 J/g; E 为蒸腾速率,g/(m²·s); Δ 为饱和水汽压随温度变化曲线的斜率,kPa/°C; R'_n 为作物冠层所截获的净辐射,J/(m²·s); LAI 为作物冠层叶面积指数; C_p 为空气的定压比热, ρ 为空气密度,本研究取 $\rho C_p = 1240$ J/(°C·m³); r_a 为叶片的空气动力学阻抗,s/m; e_s 为空气饱和水汽压,kPa; e_a 为空气实际水汽压,kPa; γ 为湿度计常数,0.0646 kPa/°C; r_c 为冠层对水汽的阻力,s/m; R_n 为到达作物冠层上方的太阳净辐射,J/(m²·s); k 为作物冠层消光系数(无量纲),对于番茄取值 0.8^[11]; T_a 为空气温度,°C; RH 为空气相对湿度,%; d 为叶片的特征尺度,番茄叶片取值为 0.15 m^[12]; u 为温室内空气流速,m/s; G 为温室自然通风率,m³/s; A_c 为垂直于平均风向的温室横截面积,指温室的轴向横截面积(温室长度×顶高),m²。

温室自然通风率由下式计算得到^[13]:

$$G = (S/2)C_d 2g(H/2)(T_{in} - T_{out})/(T_{out} + C_u u^2)^{0.5}; \quad (9)$$

$$S = 2A_v \sin(\alpha/2)。 \quad (10)$$

S 为温室有效通风面积,m²; C_d 为流量系数(无量纲),对 Venlo 型温室取值 0.644^[13]; C_w 为综合风压系数(无量纲),对于 Venlo 型温室取值 0.09^[13]; g 为重力加速度,9.8 m/s²; H 为进风口中心与出风口中心的垂直距离,对于只有天窗或只有侧窗的温室, H 为开窗垂直高度的 1/2 m; T_{in} 和 T_{out} 分别为室内、室外气温,°C; u 为室外平均风速,m/s; A_v 为温室通风窗总面积(通风窗的长度×宽度×温室通风窗的总数),m²; α 为开窗角度,°。

1.2.3 茎流仪法 包裹式茎流计利用热平衡原理来测量得到茎流,即输入热量(P_{in})等于各部分耗散热量(Q_F 、 Q_r 、 Q_v)之和,具体计算公式如下:

$$P_{in} = Q_r + Q_v + Q_f; \quad (11)$$

$$P_{in} = V^2/R; \quad (12)$$

$$Q_v = Q_u + Q_d; \quad (13)$$

$$Q_u = K_{st} \times A \times dT_u/dx; \quad (14)$$

$$Q_d = K_{st} \times A \times dT_d/dx; \quad (15)$$

$$Q_r = K_{sh} \times CH; \quad (16)$$

$$Q_f = P_{in} - Q_r - Q_v; \quad (17)$$

$$F = Q_f/(C_p \times dT); \quad (18)$$

$$dT = (AH + BH)/2。 \quad (19)$$

式中: P_{in} 为输入热量,W; Q_r 为径向散热,W; Q_v 为竖向(轴向)茎秆导热,包括 Q_u (向上方)和 Q_d (向下方),单位为 W; Q_f 为茎流携带的热量,W; K_{st} 为茎秆的热传导率,W/(m·K); A 为茎秆横截面积,m²; dT_u/dx 和 dT_d/dx 为温度

梯度, K/m ; dx 为热电偶节点间距, m ; K_{sa} 为植物鞘传导速率, W/mV ; AH 和 BH 为茎流传感器上部、下部热电偶电压差, CH 为径向电压差, mV ; F 为质量茎流速率, g/s ; C_p 为水的比热, $4.2 J/(g \cdot ^\circ C)$; dT 为液流温度增加量, $^\circ C$ 。

在供试番茄群体内选择 3 株典型植株, 用包裹式茎流仪 (FLOW32, Dynamax 公司, 美国) 连续监测其茎流, 存储每小时的茎流总量, 试验期间被测植株始终位于番茄群体内, 以保证测量结果的代表性。

2 结果与分析

2.1 设施番茄蒸腾速率的日变化

与其他 2 种方法相比, 称质量法测量结果最为可靠, 因此本研究首先用称质量法的测量结果来分析设施番茄蒸腾速率的日变化特征。从图 1、图 2 可知, 设施番茄蒸腾速率日变化规律与设施内净辐射日变化规律近似, 均是从早上日出后开始升高, 至 13:00 达到最大, 然后逐渐下降。但是蒸腾速率在中午 12:00 有明显的下降, 而净辐射则没有出现这一下降过程, 这主要是因为正午时刻, 光合有效辐射达到一天中最强, 空气温度较高, 湿度较低, 导致番茄植株发生“光合午休”, 叶片气孔部分关闭, 蒸腾速率下降^[14]。

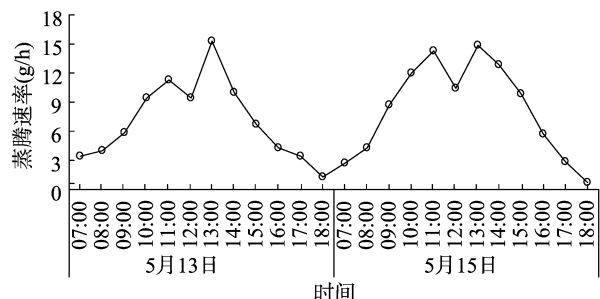


图1 设施番茄蒸腾速率的日变化

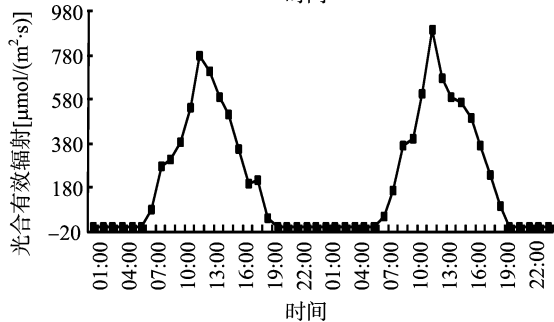
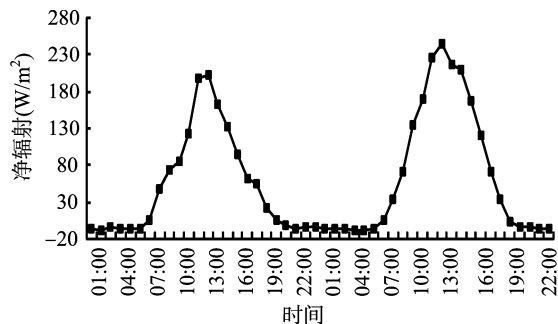


图2 温室内净辐射及光合有效辐射的日变化

2.2 不同方法测定设施番茄蒸腾速率的结果比较

利用观测所得的温室内外气象资料和叶面积指数, 根据

公式(1)~(10)计算得到设施番茄每小时的蒸腾量, 即为微气象法的估算结果, 将其与茎流仪及称质量法所测定的结果进行比较, 结果如图 3 所示。

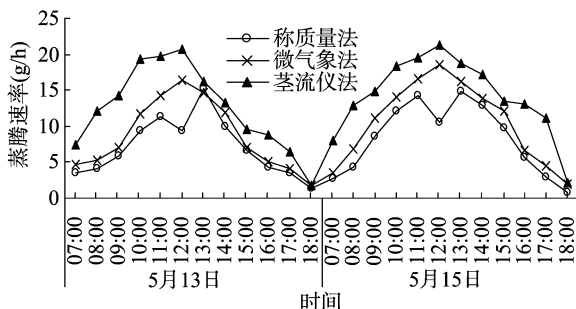


图3 3种方法测定设施番茄蒸腾速率的结果比较

从图 3 可以看出, 3 种方法所得的设施番茄蒸腾速率日变化趋势基本一致, 微气象法和称质量法的测量结果比较接近, 而茎流仪法的测量结果则大于其他 2 种方法, 说明茎流仪法测量设施番茄蒸腾速率存在普遍偏高的现象。在 3 种方法中, 仅称质量法的测量结果中番茄蒸腾速率在正午时刻出现下降, 而另外 2 种方法均未观测到这一现象。用微气象法进行计算时, 冠层阻力的计算中并未考虑“光合午休”这一现象的存在, 导致蒸腾速率的计算结果也不可能反映出正午时蒸腾速率的下降; 而茎流仪法测量的是茎干内液体的流动, 而不是植株整体水分的变化, 在正午时尽管叶片气孔部分关闭, 但很可能在植物体内部各器官之间水分的运移并未受到影响, 因而用茎流仪测定得到的茎流值并未出现下降。

2.3 不同方法测定的设施番茄日总蒸腾量比较

进一步对不同方法测量得到的设施番茄日总蒸腾量进行计算, 结果如图 4 所示。以称质量法的测量结果作为标准, 微气象法和茎流仪法测量得到的单株设施番茄日总蒸腾量均偏高, 其中微气象法偏高 25%, 茎流仪法偏高 71%。

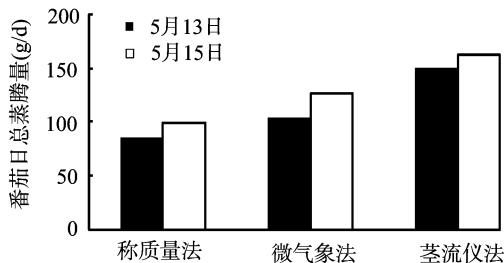


图4 3种方法测定的设施番茄日总蒸腾量

2.4 不同方法测定结果的相关关系

鉴于称质量法的测量结果比较稳定、可靠, 因此以称质量法为标准, 对微气象法与茎流仪法的测定结果进行订正。首先, 分别以称质量法测量结果为纵坐标, 其他 2 种方法测量结果为横坐标作图。由图 5、图 6 可以看出, 称质量法与微气象法测量结果存在很好的线性相关关系, 其数学表达式:

$$y = 0.79x_1 + 0.05. \quad (20)$$

式中: x_1 为微气象法计算的番茄蒸腾速率 (g/h), y 为称质量法测得的番茄蒸腾速率 (g/h), 二者的相关系数 r 达到 0.93。因此, 在设施番茄蒸腾研究中, 可以利用 (20) 式对微气象法确定的蒸腾速率进行订正。

称质量法与茎流仪法的测量结果之间也存在较好的线性

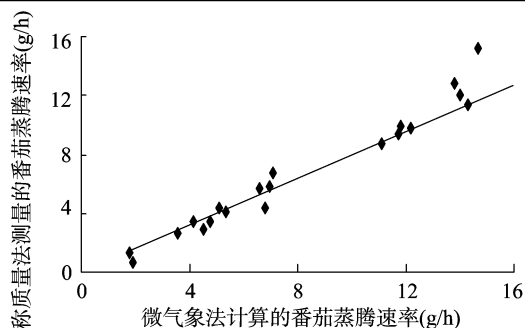


图5 称质量法与微气象法测定结果的相关关系

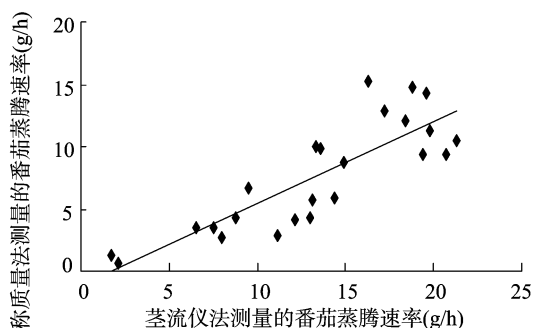


图6 称质量法与茎流仪法测定结果的相关关系

相关关系,其数学表达式:

$$y = 0.66x_2 - 1.18. \quad (21)$$

式中: x_2 为茎流仪法测得的番茄蒸腾速率(g/h), y 为称质量法测得的番茄蒸腾速率(g/h),二者的相关系数 r 为 0.84。在实际应用中,可以利用(21)式对茎流仪法测得的设施番茄蒸腾速率进行订正。

3 结论与讨论

称质量法测量设施番茄蒸腾的缺陷是耗时、耗力,无法实现长期连续观测,但其测量结果却最为可靠,常被作为标准来判断其他方法的优劣。微气象法是通过测定的气象资料计算蒸腾的方法,因为气象资料可以实现长期连续观测,因此该方法也可以获得长时间的植物蒸腾数据,但是在微气象法的计算公式中,涉及到的一些参数,如冠层阻力、空气动力学阻力等、温室内风速等都通过经验或半经验的公式得到^[15],本身容易产生较大误差。与称质量法、微气象法相比,用茎流计法测定作物蒸腾不需要破坏植株的器官,可长期连续测定单株植株的蒸腾量,然而由于茎流引起的茎干温度变化非常微小,很容易受到外界环境变化的影响,所以茎流的测定需要非常稳定的热环境,如不能满足这一条件,茎流仪测定的结果就会出现很大偏差。以往利用茎流仪测量植物蒸腾的研究多见于树木、玉米等茎干较粗的植物^[3,16-17],且大都是在露地条件下进行的,有关茎流仪在设施蔬菜蒸腾研究中的应用少见报道。

本研究开展试验,比较了称质量法、微气象法及茎流仪法测量得到的设施番茄蒸腾速率,证实以称质量法测量结果为对照,微气象法和茎流仪法测得的单株设施番茄日蒸腾量分

别偏高 25% 和 71%,因此用微气象法和茎流仪法 2 种方法测量的设施番茄蒸腾量必须经过校准后才能应用。根据本研究的结果,称质量法与微气象法、茎流仪法的测量结果之间都存在很好的线性相关关系,因此可以用称质量法的测量数据对其他 2 种方法测定结果进行订正,以获得较为准确的番茄蒸腾速率。今后还需要设置不同生育期、不同栽培茬口、不同番茄品种的试验,对微气象法、茎流仪法的测定结果进行订正,获得更为可靠的订正公式,以推动微气象法、茎流仪法等自动观测方法在设施作物蒸腾监测中的应用。

参考文献:

- [1] 邓东周,范志平,王 红,等. 林木蒸腾作用测定和估算方法[J]. 生态学杂志,2008,27(6):1051-1058.
- [2] 王华田. 林木耗水性研究述评[J]. 世界林业研究,2003,16(2):23-27.
- [3] 刘奉觉,郑世错,巨关升,等. 树木蒸腾耗水测算技术的比较研究[J]. 林业科学,1997,33(2):117-126.
- [4] 汪小昆,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.
- [5] 罗卫红,汪小昆,戴剑锋,等. 南方现代化温室黄瓜冬季蒸腾测量与模拟研究[J]. 植物生态学报,2004,28(1):59-65.
- [6] 戴剑锋,罗卫红,徐国彬,等. 长江中下游地区 Venlo 型温室空气温湿度以及黄瓜蒸腾速率模拟研究[J]. 农业工程学报,2005,21(5):107-112.
- [7] 龙秋波,贾绍凤. 茎流计发展及应用综述[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(4):18-23.
- [8] 王瑞辉,奚如春,徐军亮,等. 用热扩散式茎流计测定园林树木蒸腾耗水量[J]. 中南林业学院学报,2006,26(2):7-12.
- [9] 杨再强,张婷华,李永秀,等. 不同水分胁迫条件下温室番茄茎流和叶片水势的反应[J]. 中国农业气象,2012,33(3):382-387.
- [10] 岳广阳,张铜会,刘新平,等. 热技术方法测算树木茎流的发展及应用[J]. 林业科学,2006,42(8):102-108.
- [11] 戴剑锋,金 亮,罗卫红,等. 长江中下游 Venlo 型温室番茄蒸腾模拟研究[J]. 农业工程学报,2006,22(3):99-103.
- [12] Boulard T, Mermier M, Fargues J, et al. Tomato leaf boundary layer climate: implications for microbiological whitefly control in greenhouses[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 110(3):159-176.
- [13] Boulard T, Draoui B. Natural ventilation of a greenhouse with continuous roof vents: measurements and data analysis[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1995, 61(1):27-36.
- [14] 叶子飘,于 强. 一个光合作用光响应新模型与传统模型的比较[J]. 沈阳农业大学学报,2007,38(6):771-775.
- [15] Boulard T, Wang S. Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 100(1):25-34.
- [16] 张小由,龚家栋,周茅先,等. 胡杨树干液流的时空变异性研究[J]. 中国沙漠,2004,24(4):489-492.
- [17] 尹光彩,周国逸,王 旭,等. 应用热脉冲系统对桉树人工林树液流通量的研究[J]. 生态学报,2003,23(10):1984-1990.