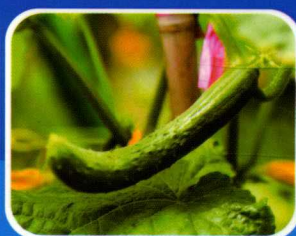


主 编：薛晓萍
副主编：李鸿怡

设施 气象灾害预警 农业 及 防御技术



设施农业气象灾害预警 及防御技术

主 编：薛晓萍

副主编：李鸿怡



气象出版社

China Meteorological Press

内 容 简 介

设施农业是通过对工程技术、生物技术和信息技术的综合应用,实现农业高产、优质、高效、安全和年年生产。“设施农业气象灾害预警及防御关键技术”为公益性行为(气象)科研专项的重点项目。项目以日光温室和塑料大棚为研究对象,围绕不同类型灾害性天气条件下(低温、寡照、暴雪、大风)设施农业气象灾害指标的确定、设施农业气象灾害精细化预报预警模型的构建、设施农业气象灾害防御以及设施农业气象灾害风险区划等技术开展相关研究。

本书既是对项目3年研究成果的总结,也是对从事设施农业气象服务与研究技术人员的多年工作成果阶段性总结,主要包括设施农业气象灾害指标确定技术、设施农业气象灾害预报预警技术、设施农业气象灾害防御技术和设施农业气象灾害风险评价与区划等四方面内容。收录了设施农业气象灾害预警及防御技术研究论文,介绍了设施内常见农业气象灾害及其防御技术,中国南方塑料大棚气象灾害风险区划,以及设施黄瓜、番茄等蔬菜的栽培技术。

图书在版编目(CIP)数据

设施农业气象灾害预警及防御技术/薛晓萍主编.

北京:气象出版社,2014.11

ISBN 978-7-5029-6044-5

I. ①设… II. ①薛… III. ①设施农业—农业气象灾害—预报—研究—中国②设施农业—农业气象灾害—防御—研究—中国 IV. ①S42

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 256911 号

Sheshi Nongye Qixiang Zaihai Yujing ji Fangyu Jishu

设施农业气象灾害预警及防御技术

薛晓萍 主编

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街46号

总 编 室:010-68407112

网 址: <http://www.qxcbs.com>

责任编辑:马 可 崔晓军

封面设计:易普锐创意

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

字 数:588千字

版 次:2014年11月第1版

定 价:92.00元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:章澄昌

责任技编:吴庭芳

印 张:23

印 次:2014年11月第1次印刷

《设施农业气象灾害预警及防御技术》

编委会

主 编：薛晓萍

副主编：李鸿怡

编 委：	陈 辰	陈笑娟	费玉娟	杜子璇	黄川容
	李 春	李 军	李 楠	李 宁	李树军
	李旭杰	李叶萌	李永秀	黎贞发	刘淑梅
	彭晓丹	田宏伟	王春玲	王 铁	王孝卿
	王 鑫	魏瑞江	薛庆禹	薛正平	杨光仙
	杨再强	于 红	袁 静	张 波	张继波
	张 昆	张婷华	朱 静		

前 言

设施农业是通过对工程技术、生物技术和信息的综合应用,实现农业高产、优质、高效、安全和周年生产。我国设施农业产业经过引进、消化、吸收和自我创新,形成了内容较为完整、具备相当规模的主体产业群,尤其在 2008、2009 年连续两年中央一号文件强调了推进设施农业发展之后,以节能型日光温室和塑料大棚为主的我国设施农业生产进入迅猛发展阶段,逐步具有了产业化、标准化和国际化等典型的现代农业特点,极大地促进了区域农业提效、农民增收,成为我国农村经济发展的支柱产业。

然而,由于我国农业生产上使用的设施结构相对简陋,设施内小气候环境受外界气象条件影响较大,其生产对外界气象条件依赖程度较高,而我国又是自然灾害多发国家,尤其是在气候变化背景下,各种极端气候事件发生频率增大、强度增强,一旦出现低温、暴雪、连阴天等灾害性天气,设施作物产量和品质即受到严重冲击,同时次生灾害对产量品质均有较大影响,农业气象灾害成为设施农业可持续发展的主要制约因素之一。因此,设施农业是最易受到气象条件影响的脆弱产业,也是最需要提供专业气象保障服务的行业,但关于设施农业气象灾害的监测、预警服务等技术相对滞后。为此,财政部、科技部于 2010 年将“设施农业气象灾害预警及防御关键技术”列为公益性行为(气象)科研专项的重点项目。项目以日光温室和塑料大棚为研究对象,围绕不同类型灾害性天气条件下(低温、寡照、暴雪、大风)设施农业气象灾害指标的确定、设施农业气象灾害精细化预报预警模型的构建、设施农业气象灾害防御以及设施农业气象灾害风险区划等技术开展相关研究。本书既是对项目三年研究成果的总结,也是对从事设施农业气象服务与研究技术人员的多年工作成果阶段性总结。

本书主要包括设施气象灾害指标确定技术、设施农业气象灾害预报预警技术、设施农业气象灾害防御技术和设施农业气象灾害风险评价与区划等四方面内容。在编写的过程中,得到了南京信息工程大学应用气象学院、天津市气候中心、河北省气象科学研究所、上海市气候中心和河南省气象科学研究所等协作单位的大力支持与合作,借此机会,对参加项目研究的专家、研究生一并表示感谢。

由于研究周期短,对相关的科学技术问题研究还不够深入,尚有许多不足之处,请广大读者多提宝贵意见,以便共同推动设施农业气象服务技术快速发展。

作者
2014 年 10 月

目 录

前言

设施农业气象灾害指标确定技术

不同水分胁迫条件下温室番茄茎流和叶片水势的反应	杨再强, 张婷华, 李永秀, 等 / 1
水分胁迫对番茄叶片光合特性和叶绿素荧光参数的影响	张婷华, 杨再强, 李永秀, 等 / 9
相对湿度对黄瓜叶片光合特性的影响	张婷华, 杨再强, 李叶萌, 等 / 17
低温胁迫对番茄光合特性及抗氧化酶活性的影响	杨再强, 张波, 张继波, 等 / 25
高温胁迫对设施草莓抗氧化酶活性的影响	朱静, 杨再强 / 34
寡照胁迫对黄瓜光合特性及抗氧化酶活性的影响	杨再强, 张波, 张继波, 等 / 43
寡照对设施黄瓜光合特性的影响研究	张继波, 薛晓萍, 李鸿怡, 等 / 52
寡照对温室黄瓜光合、形态及产量的影响	张继波, 薛晓萍, 李鸿怡 / 60
遮光对大棚黄瓜生长、花果及产量影响试验	薛正平, 李军, 张皓, 等 / 69
遮阳对番茄和青菜生长及产量影响试验研究	薛正平, 李军, 张皓, 等 / 77
设施芹菜光合特性对寡照胁迫的响应	朱静, 杨再强, 张波, 等 / 84
设施塑料大棚风洞试验及风压分布规律的研究	杨再强, 张波, 薛晓萍, 等 / 93
低温寡照对日光温室番茄幼苗生长的影响	于红, 黎贞发, 罗新兰, 等 / 104
温室黄瓜低温气象灾害指标	彭晓丹, 杨再强, 张婷华, 等 / 112
Disaster-inducing Factors and Integrated Climatic Index for Cucumber Chilling Injuries in Sunlight Greenhouse	Wang Xin, Wei Ruijiang, Xing Wenfa / 124
三种光温指标在模拟设施黄瓜生长发育中的应用与比较	李叶萌, 李冉, 杨再强 / 134

设施农业气象灾害预报预警技术

下沉式日光温室气温和土温时空变化特征研究	刘淑梅, 薛庆禹, 李春 / 144
苏北地区日光温室能量分配动态研究	裴道好, 杨再强, 张静, 等 / 153
北方日光温室北墙和后坡热通量日变化的谐波特征	张昆, 黎贞发, 李天来 / 162
山东寿光冬季日光室内温度变化特征及低温预报	袁静, 李树军, 崔建云, 等 / 168
寿光日光温室小气候变化规律及模拟方法	王孝卿, 李楠, 薛晓萍 / 176
基于物联网的日光温室低温灾害监测预警技术及应用	黎贞发, 王铁, 宫志宏, 等 / 185



基于 BP 神经网络的冬季日光温室小气候模拟	王春玲,魏瑞江,申双和,等/194
基于主成分回归的日光温室内低温预测模型	李宁,申双和,黎贞发,等/205
日光温室小气候预报技术研究	薛晓萍,李鸿怡,李楠,等/215
The Microclimate Change Rules and Simulation Method Preliminary for Forecasting Temperature in Northern Greenhouse	Li Nan, Xue Xiaoping, Li Hongyi, <i>et al.</i> /225
Heliogreenhouse Ground Temperature Forecasting Technology Research	Xue Xiaoping, Yang Dan, Li Nan/237

设施农业气象灾害防御技术

持续低温及低温连阴天气下几种典型日光温室保温性能评价	黎贞发,于红/248
日光温室电暖风机加温效果评估及其经济效益分析	李宁,黎贞发,申双和,等/258
天津地区不同墙体处理对日光温室保温性能影响初探	刘淑梅,薛庆禹,李春,等/268
日光温室中加扣小拱棚的小气候效应	陈笑娟,魏瑞江,薛华,等/278

设施农业气象灾害风险评价与区划

日光温室黄瓜低温冷害风险评估技术研究	薛晓萍,李楠,杨再强/287
中国南方塑料大棚气象灾害风险区划的研究	杨再强,朱凯,赵翔,等/295
设施农业气象灾害风险评估技术研究与应用	李春,刘淑梅,宫志宏,等/306
北方地区设施农业风灾时空分布分析	田宏伟,杜子璇,杨光仙/314
江苏省设施农业寡照灾害时空分布规律的研究	杨再强,费玉娟,朱静,等/322
北方地区设施农业雪灾时空分布分析	杜子璇,田宏伟,杨光仙/330
天津市北辰区设施农业温光气候资源变化分析	赵淑兰,李春,张绍祥,等/336
北方七省市日光温室西红柿低温冷害风险区划	杨光仙,杜子璇,刘忠阳/342

不同水分胁迫条件下 温室番茄茎流和叶片水势的反应^{*}

杨再强^{1,2}, 张婷华¹, 李永秀¹, 彭晓丹¹, 周志龙¹, 朱 凯¹, 赵 翔¹

(1. 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044;

2. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

摘 要:以番茄“金粉2号”品种为试材,设计3个土壤水分处理试验,即正常灌溉(T1)、轻度胁迫(T2)和重度胁迫(T3),观测不同土壤水分条件下番茄植株的茎流速率和叶片水势。结果表明,番茄茎流速率日变化呈现明显的规律性,晴天,T1和T2的番茄茎流速率呈明显的双峰曲线,中午12:00左右气孔关闭,茎流速率出现低谷。阴天,T1和T2的番茄茎流日变化趋势总体较为平缓。不同水分处理下番茄的蒸腾量存在显著差异,水分胁迫处理的番茄蒸腾量均小于正常灌溉,土壤水分胁迫程度越严重,日蒸腾量越低。随着水分胁迫处理天数的增加,不同灌溉处理番茄的蒸腾量差异逐渐缩小。叶片水势随灌溉后天数增加而逐渐减少,叶片水势 $T1 > T2 > T3$ 。相关分析表明,影响番茄茎流的主要气象因子为太阳辐射、空气温度和空气相对湿度。研究认为,番茄茎流与太阳辐射、空气温度和土壤水分呈正相关,叶片水势与空气相对湿度呈负相关。研究结果可为设施番茄水分诊断和管理提供科学依据。

关键词:番茄;茎流;水势;水分胁迫

番茄原产于南美西部高原地带,属喜温作物,是中国最主要的设施作物之一。温室土壤水分直接影响番茄的生长发育、产量和品质,也影响植株蒸腾量的大小和体内水分的多少^[1-3]。茎干液流量可直接表征作物的蒸腾量^[4],而叶片水势可反映植物体内水分状况。因此,研究茎干液流量和叶片水势对土壤水分的响应规律,可为设施番茄水分诊断和管理提供依据。

国内外关于土壤水分对作物蒸腾和叶片水势影响的研究有一定报道。前人研究表明,随着土壤水分胁迫程度的增加,作物叶片蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和叶片水势明显下降,细胞液浓度显著升高^[5,6]。Turnera等^[7]研究表明,随着干旱胁迫的增加,土壤水势从-1 kPa下降到-60 kPa,香蕉净光合速率也随之下降。罗永忠等^[8]认为,苜蓿叶水势、蒸腾速率和气孔导度均随水分胁迫加剧而降低,最低叶片水势随土壤水分降低而降低。水势是反映作物内部水分状况的指标^[9],成雪峰等^[10]认为,在植物各部位的水势中,叶片水势是反映植物体内水分亏缺最敏感的生理指标。叶片水势随着土壤水分胁迫的增加而下降,复水后能够达到最初的水平^[11]。王丁等^[12]对主要造林树种苗木叶片水势的研究表明,随着胁迫强度的增加,6种树种不同生长时期,其叶片水势均表现出下降趋势,在干旱胁迫下,所有树种叶片水势均以生

^{*} 本文已发表于《中国农业气象》2012年03期。

长旺期的下降幅度最大,生长末期次之,生长初期最小。

作物蒸腾测定常见方法有放射性同位素法^[13]、蒸渗仪法^[14]、整树容器法^[15]、快速称重法^[16]以及热技术法^[17,18]。包裹式茎热平衡法(Stem Heat Balance, SHB)是热技术法中最常见的一种。其最大特点是无须标定,也无须将温度探头插入茎秆中,测量方便、准确,对树木的损伤也最小,可以直接得到测定结果^[19],在研究作物茎流规律方面已经得到广泛应用^[20,21]。Rosanne 等^[22]分别用茎热平衡计对甘蔗和山核桃树冠的蒸腾规律进行了研究。Kigalu^[23]用茎热平衡计研究了茶树的种植密度及其对水资源的利用规律。但关于不同土壤水分胁迫下温室番茄的茎流速率和叶片水势的变化规律研究少见报道。本研究使用热平衡包裹式茎流计(SHB)对番茄茎干液流进行连续观测,研究不同水分胁迫处理对番茄茎干液流及叶片水势的影响,为温室番茄栽培提供一定理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2011 年 4 月 1—8 日在南京信息工程大学试验温室(Venlo 型)内进行。试验期间,4 月 2、6、7 日是阴天,其余时间为晴天。试验温室顶高 5.0 m、肩高 4.5 m、宽 9.6 m、长 30.0 m,南北走向,室内有补温设施。以番茄“金粉 2 号”品种为试材,土壤为中壤土,在温室中整畦种植,畦长 8 m,宽 1 m。每畦栽两行,行距 30 cm,株距 40 cm。茎流试验于番茄坐果期进行,设置 3 个土壤水分处理:正常灌溉 T1(田间最大持水量的 70%~80%),轻度胁迫 T2(田间最大持水量的 50%~60%),重度胁迫 T3(田间最大持水量的 30%~40%)。不同处理在不同水泥池的苗床内进行,处理期间不存在侧渗,计划湿润层深度为 40 cm,灌溉方式为浇灌。观测期间 20 cm 土壤水分的变化过程如图 1 所示,不同处理的土壤水分在试验期间均呈缓慢下降趋势。灌溉初期(4 月 1 日),各处理的 20 cm 处土壤体积含水率分别为:T1 为 44.8%,T2 为 29.6%,T3 为 22.8%。随着灌溉后天数的增加,土壤含水率缓慢下降。在灌溉后第 3 天,各处理的土壤含水率趋于平稳并且逐渐接近,各灌溉处理土壤的含水率分别为:T1 为 23.1%,T2 为 21.0%,T3 为 19.6%。

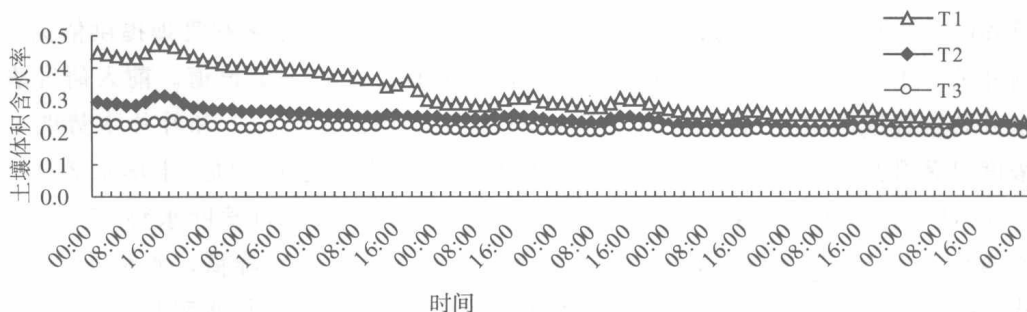


图 1 2011 年 4 月 1—8 日不同土壤水分随处理时间的日变化

1.2 项目测定

(1)茎流速率测定:每个处理选择有健康、生长一致的植株 6 株,利用包裹式茎流计

(Flow4, Dynamax, USA)测定茎流速率,采集间期为 10 min,然后每 30 min 记录 3 次数据的平均值。日蒸腾量计算为

$$DT = \sum Sr_i \times N / 1000\rho \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 24) \quad (1)$$

其中, DT 为每日蒸腾量(mm), Sr_i 为单株茎流速率($\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$), N 为番茄定植密度($\text{plant} \cdot \text{m}^{-2}$), ρ 为水的密度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。

(2)气象要素:利用全自动微型气象站(Watchdog2000, USA)测定气温、空气相对湿度、太阳合有效辐射等气象因子,采集间期为 10 分钟,然后每 30 分钟记录 3 次数据的平均值。

(3)土壤水分测定:采用土壤含水率测定仪(EM50, USA),测定各处理 20 cm 土层处的土壤体积含水率,每 1 小时自动测定 1 次。

(4)叶片水势测定:用露点水势仪(WP4, USA)测定叶片水势,测定时选择植株中部生长健壮的成熟叶片,08:00、12:00、16:00 各测定 1 次,每个时间 5 次重复取平均值。

用 Excel 2000 和 DPS 统计软件对数据进行整理和分析。

2 结果与分析

2.1 番茄植株茎流速率的反应

不同土壤水分处理的番茄茎流速率见图 2。由图可见,观测期间,番茄茎流变化呈现明显的规律性,白天茎流速率大,晚上较小,且不同水分条件下,番茄茎流速率的日变化规律存在显著差异。晴天(4 月 1、3、4、5、8 日),正常灌溉(T1)和轻度胁迫(T2)处理中植株的茎流速率总体呈明显的双峰曲线。6:00 左右茎流开始增加,随着太阳辐射的增强和气温升高,茎流速率迅速增大,到 11:00 左右达到峰值;12:00—14:00,由于太阳辐射的增强和温室温度升高,叶片气孔关闭,茎流速率迅速减小;到 14:00—16:00,蒸腾出现第二个峰值,此时茎流速率又增加;16:00 以后,随着辐射减少,茎流逐渐趋于零。而重度胁迫处理(T3)中植株的茎流速率受到明显抑制,茎流速率随太阳辐射和温度的变化不明显,变化幅度不大,总体相对平稳。比较各处理茎流速率的峰值大小发现, $T1 > T2 > T3$,说明晴天时番茄蒸腾作用强烈,土壤水分胁迫明显影响到番茄的蒸腾耗水。

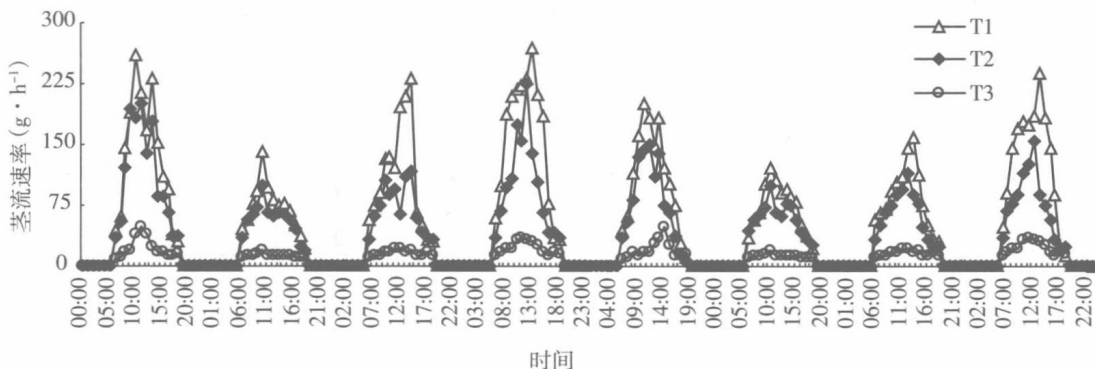


图2 2011年4月1—8日不同水分处理番茄茎流速率的日变化

阴天(4 月 2、6、7 日),太阳辐射强度不高,温度变化也不大。各处理番茄的茎流在 7:00 左右开始启动,之后逐渐增加,随后减小,表现为单峰曲线,但其峰值大小和峰值的出现时间与

晴天有一定差异。特别是 T1 和 T2 的植株,其茎流速率峰值比晴天减小了 50%左右,而 T3 处理植株其茎流速率日变化很平缓,无明显的峰谷值,显示番茄的蒸腾活动不活跃。

2.2 番茄植株日蒸腾量的反应

土壤水分含量直接影响作物耗水量和蒸腾速率,表 1 是试验期间根据采集的茎流数据计算得到的不同水分处理下番茄日蒸腾量。灌溉初期(4 月 1 日),轻度胁迫(T2)和正常灌溉(T1)的蒸腾量差别不大,日蒸腾量分别为 10.44 mm 和 8.52 mm,重度胁迫(T3)的蒸腾量仅为 2.69 mm。T2 和 T3 处理的日蒸腾量分别为 T1 的 80.98%和 25.76%。随着水分处理天数的增加,土壤含水率不断降低,不同灌溉处理番茄的蒸腾量差异逐渐缩小,4 月 8 日,T2 和 T3 处理的日蒸腾量分别为 T1 的 76%和 23%。晴天,不同处理日蒸腾量差异明显,如 4 月 4 日,T2 的蒸腾量与 T1 相差 4.49 mm。而阴天,如 4 月 2 日,T2 的日蒸腾量与 T1 仅相差 1.12 mm。T3 处理的日蒸腾量明显低于 T2 和 T1,主要因为 T3 处理土壤含水率低,根系吸收水分量少。

表 1 不同处理下番茄植株的日蒸腾量(mm)

处理	4 月 1 日	4 月 2 日	4 月 3 日	4 月 4 日	4 月 5 日	4 月 6 日	4 月 7 日	4 月 8 日
T1	10.44	5.54	8.85	12.24	8.59	5.31	6.64	7.42
T2	8.52	4.42	5.52	7.75	6.31	4.91	4.86	5.67
T3	2.69	1.02	1.25	1.77	1.60	1.03	1.26	1.76

2.3 番茄叶片水势的反应

叶片水势不仅是反映植物缺水程度的最灵敏的指标,而且可以反映土壤—植物—大气系统(SPAC)水分的流动力^[9]。观测期间不同土壤水分条件下叶片水势的变化过程如图 3 所示。由图可见,各处理番茄的叶片水势均随处理天数的增加逐渐降低,但降低幅度因水分条件不同而异。灌溉初期(4 月 1 日),叶片水势相对整个观测期较高,T1 平均为-0.62 MPa,T2 为-1.26 MPa,T3 为-1.05 MPa,不同处理叶片水势差异达到显著水平($\alpha<0.05$)。随着处理时间的延长,叶片水势逐渐降低,并且胁迫越重降幅越大,因此,各处理叶片水势间的差值加大。到灌溉后期(4 月 8 日),不同处理叶片水势差异达到极显著水平($\alpha<0.01$)。T1 为-1.93 MPa,T2 为-4.86 MPa,T3 为-5.06MPa,与观测之初的差值分别达到 0.64、3.60、

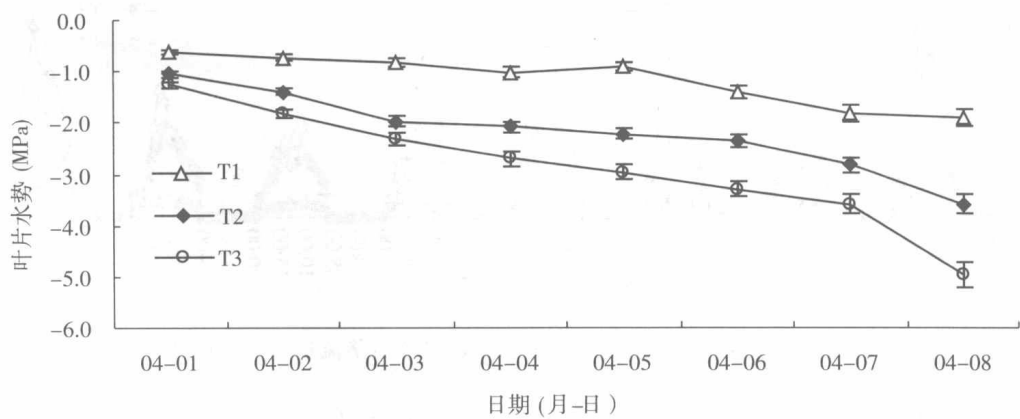


图 3 叶片水势随处理天数的变化

4.01 MPa,说明在观测的 8 d 时间里,由于土壤水分的消耗,土壤水势会逐渐升高,植株获取土壤水的难度加大。所以,叶片的水分状况变差、水势逐渐降低,并且土壤水分条件越差(重度胁迫处理),叶片水势降低幅度越大。

2.4 番茄茎流与环境因子的关系

各环境因子对植物蒸腾过程的影响是一个十分复杂的过程。相关研究表明,植物茎流变化影响因子主要有太阳辐射、空气相对湿度、空气温度、风速、土壤水分等^[24,25]。因试验是在玻璃温室中进行,故不考虑风速和降雨对番茄茎流的影响。对番茄茎流和环境因子及叶片水势进行相关分析结果见表 2。结果显示,各处理下番茄茎流速率与空气温度、太阳辐射和土壤水分呈正相关,与空气相对湿度和叶片水势成负相关。茎流速率与各因子的相关性由高到低依次为:太阳辐射>空气温度>空气相对湿度>土壤水分>叶片水势,其中茎流速率和太阳辐射、空气温度、空气相对湿度的相关性达到极显著水平。茎流速率与土壤水分相关达到显著水平,主要因为本研究采用 20 cm 土层的含水率,而番茄的根系在土层 20 cm 以下仍可吸收水分。

表 2 茎流速率与叶片水势、环境因子的相关性

	茎流速率	空气温度	空气相对湿度	太阳辐射	土壤水分	叶片水势
茎流速率	1					
空气温度	0.690**	1				
空气相对湿度	-0.678**	-0.907**	1			
太阳辐射	0.816**	0.675**	-0.678**	1		
土壤水分	0.564*	0.489**	-0.368**	-0.029	1	
叶片水势	-0.095	0.244*	-0.124	-0.244*	0.857**	1

注:*表示在 0.05 水平上显著相关;**表示在 0.01 水平上显著相关。

进一步分析番茄茎流变化与各环境因子变化的相关关系,Irvine J 等^[26]研究表明,在各主导环境因子中,水分起绝对主导作用。以番茄茎流速率(Y)为因变量,以空气温度(X_1)、空气相对湿度(X_2)、太阳辐射(X_3)为自变量,以 0.05 和 0.1 可靠性作为变量入选和剔除临界值,经过逐步回归,得到不同处理下番茄茎流速率与环境因子的多元回归方程(见表 3)。多元回归方程方差分析结果显示,模型的显著性 $\alpha < 0.01$,说明因变量与自变量间存在较强的线性相关关系。

表 3 番茄茎流速率与环境因素之间的逐步回归分析结果

处理	逐步回归方程	相关系数
T1	$Y=52.97914+2.6767X_1-0.97949X_2+0.2905X_3$	0.832**
T2	$Y=6.4024+0.2346X_1-0.0910X_2+0.03140X_3$	0.820**
T3	$Y=2.7457+2.0060X_1-0.2877X_2+0.1982X_3$	0.797**

注:**表示变量与自变量间极显著相关($\alpha < 0.01$)。

3 结论与讨论

本研究通过定株观测试验,研究了正常灌溉、轻度胁迫、重度胁迫对温室番茄植株的茎流速率和叶片水势的影响。结果显示晴天正常灌溉和轻度胁迫番茄茎流速率呈明显的双峰曲

线,阴天茎流日变化趋势总体较为平缓。随土壤水分胁迫程度加剧,日蒸腾量降低,不同灌溉处理番茄的蒸腾量差异随水分胁迫时间增加逐渐缩小,叶片水势随灌溉后天数增加而逐渐减少。该研究结果为温室番茄水分诊断和管理提供参考。

作物茎流的变化由气孔的开度、茎秆及根系的水力传导特性、土壤水分状况和气象因子共同影响^[27]。本文采用包裹式茎流计对温室番茄植株茎流进行了连续定点观测。结果表明,晴天,各处理下茎流启动较早,正常灌溉和轻度胁迫的番茄茎流速率呈明显的双峰曲线,主要由于中午太阳辐射强,温室温度较高,叶片气孔出现暂时关闭;重度胁迫下,茎流则受到明显抑制,整体变化趋势很平缓。而在阴天,茎流启动较晚,正常灌溉和轻度胁迫的番茄茎流日变化趋势总体较为平缓;重度胁迫的液流变化趋势不明显。主要因为土壤水分是植物蒸腾的水分来源,它决定作物茎流的总体水平^[28],土壤含水率直接影响叶片的含水率,进而影响气孔扩散阻力、控制蒸腾速率。当土壤含水率在正常灌溉水平及以下的一定范围内时,土壤水分多,此时植物和土壤之间水势梯度大,有利于植株从土壤中吸收水分,充分满足植物蒸腾耗水的需要。

叶片水势是土壤—植物—大气之间水分平衡状态的综合反映,受叶片—大气水汽压差、叶面截获辐射、土壤可利用水分、水分在植物体内的传导和气孔调节的综合影响^[29]。一般情况下,植物叶片水势会随着土壤水势的下降而降低,以利于苗木从土壤中吸收水分^[9]。本研究结果表明,随着土壤水分处理天数的增加,水分胁迫强度的增强,番茄叶片水势表现出下降趋势。

与番茄茎流有关的主要气象因子为太阳辐射、空气温度和空气相对湿度。对各主要环境因子的相关分析和逐步回归分析表明,各处理下番茄茎流速率与土壤水分、太阳辐射和温度呈正相关,与空气相对湿度和叶片水势呈负相关。这与彭致功等^[30]对日光温室条件下番茄植株蒸腾规律的研究结果一致。本研究仅对温室番茄进行一次灌溉后进行茎流测定,并未进行持续灌溉来保持恒定的田间持水量。今后可在控制环境下进一步研究恒定土壤水分对番茄茎流的影响。另外,本研究仅利用 20cm 土层的水分含量,未能完全反映整个土体水分变化情况。今后可测定不同土层水分,进一步研究番茄植株水分利用与不同土层水分间的关系。

参考文献

- [1]郭艳波,冯浩,吴普特.水分亏缺对番茄生理特性及水分生产效率的影响[J].灌溉排水学报,2008,27(3):52-55.
- [2]Harmanto, Salokhe V M, Babel M S, et al. Water requirement of drip irrigated tomatoes grown in greenhouse in tropical environment[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 71(3): 225-241.
- [3]Cherubino Leonardi, Soraya Guichard, Nadia Bertin. High vapour pressure deficit influences growth, transpiration and quality of tomato fruits[J]. *Scientia Horticulturae*, 2000, 84(3-4): 285-296.
- [4]张雷,孙鹏森,刘世荣.树干液流对环境变化响应研究进展[J].生态学报,2009,29(10):5600-5610.
- [5]Emilio Nicolas, Arturo Torrecillas, Jose DellAmico, et al. The effect of short-term flooding on the sap flow, gas exchange, and hydraulic conductivity of young apricot trees[J]. *Tress*, 2005, 19(1): 51-57.
- [6]陈金平,刘祖贵,段爱旺,等.土壤水分对温室盆栽番茄叶片生理特性的影响及光合下降因子动态[J].西北植物学报,2004,24(9):1589-1593.
- [7]Turnera D W, Thomas D S. Measurements of plant and soil water status and their association with leaf gas exchange in banana (*Musa* spp.): a laticiferous plant[J]. *Scientia Horticulturae*, 1998, 77(3-4): 177-193.
- [8]罗永忠,成自勇.水分胁迫对紫花苜蓿叶水势、蒸腾速率和气孔导度的影响[J].草地学报,2011,19(2):

- 216-221.
- [9]董玉峰,张恒,韩俊,等.几个经济树种蒸腾作用对连续土壤水分变化过程的响应[J].江西农业大学学报,2007,29(5):796-800.
- [10]成雪峰,张凤云,柴守玺.春小麦对不同灌水处理的气孔反应及其影响因素[J].应用生态学报,2010,21(1):36-40.
- [11]Schaub M, Skelly J M, Steiner K C, *et al.* Physiological and foliar injury responses of *Prunus serotina*, *Fraxinus americana*, and *Acer rubrum* seedlings to varying soil moisture and ozone[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 124(2): 307-320.
- [12]王丁,姚健,杨雪.干旱胁迫条件下6种喀斯特主要造林树种苗木叶片水势及吸水潜能变化[J].生态学报,2011,31(8):2216-2226.
- [13]Yan C R, Alec D, Han X G, *et al.* A study on sap flow of *Juglansm* and *shurica* of growth season in deciduous broad-leaf forest Beijing mountain area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(6): 793-797.
- [14]Xu X Y, Zhang R D, Xue X Z, *et al.* Determination of evapotranspiration in the desert area using lysimeters[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1998, 1(2): 1-15.
- [15]Liu F J, Zheng S K, Ju G S, *et al.* A study on comparison of measuring water-consumption for transpiration in poplar[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1997, 33(2): 119-125.
- [16]Liu F J. A study on the measurement of transpiration rate in a poplar by means of quick-weighting method[J]. *Forest Research*, 1990, 3(2): 162-165.
- [17]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.
- [18]刘超,李春友,张劲松,等.生长季大叶女贞树干液流的径向分布特征[J].中国农业气象,2011,32(2):196-201.
- [19]段爱旺.一种可以直接测定蒸腾速率的仪器——茎流计[J].灌溉排水,1996,14(3):44-47.
- [20]Hall R L, Allen S J, Rosier P T W, *et al.* Transpiration from coppiced poplar and willow measured using sap-flow methods[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 90(4): 275-290.
- [21]Kentaro T, Yoshinobu H, Shinichi N, *et al.* Evaluation of the transpiration rate of lotus using the stem heat-balance method[J]. *Aquatic Botany*, 2006, 85(2): 129-136.
- [22]Rosanne C, Sami B, Daniel Z, *et al.* Evaluation of the sap flow determined with a heat balance method to measure the transpiration of a sugarcane canopy[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 75(1): 10-24.
- [23]Kigalu J M. Effects of planting density on the productivity and water use of tea (*Camellia sinensis* L.) clones measurement of water use in young tea using sap flow meters with a stem heat balance method[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 90(3): 224-231.
- [24]郭跃,丁国栋,吴斌,等.毛乌素沙地沙木蓼茎干液流规律研究[J].水土保持通报,2010,30(5):22-26.
- [25]金红喜,徐先英,唐进年,等.花棒液流变化规律及其对环境因子的响应[J].西北植物学报,2006,26(2):354-361.
- [26]Irvine J, Perks M P, Magnani F, *et al.* The response of *Pinus sylvestris* to drought: stomatal control of transpiration and hydraulic conductance[J]. *Tree Physiology*, 1998, 18(6): 393-402.
- [27]刘浩,孙景生,段爱旺,等.温室滴灌条件下番茄植株茎流变化规律试验[J].农业工程学报,2010,26(10):77-81.
- [28]陈晓燕,谷忠厚,田有亮,等.大青山油松人工林树干液流特征及其与主要气象因子的关系[J].水土保持研究,2009,28(6):97-101.
- [29]赵昌杰,刘松忠,张强.果树对于干旱胁迫的响应研究进展[J].中国果树,2011,(4):60-61.
- [30]彭致功,杨培岭,段爱旺,等.日光温室条件下番茄植株蒸腾规律研究[J].干旱地区农业研究,2004,22(1):62-65.



Response of the Sap Flow and Leaf Water Potential for Greenhouse Tomato to Soil Water Moisture

Yang Zaiqiang^{1,2}, Zhang Tinghua¹, Li Yongxiu¹,

Peng Xiaodan¹, Zhou Zhilong¹, Zhu Kai¹, Zhao Xiang¹

(1. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, 210044, China;

2. College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, 210044, China)

Abstract: In order to study the effects of various water supply on the sap flow and leaf potential of tomato in the greenhouse, a research has been conducted under three models of water supply such as normal water supply(T1), light water stress treatment(T2) and severe water stress treatment(T3) to tomato cv. 'Jingfen 2' which was chosen as the trail material. The results showed that the diurnal variability of sap flow of tomato presented its regularity, in sunny days, a bimodal curve occurs to the tomato with T1 and T2, and the stoma closed and the lower point of sap flow rate occurs at about 12:00. Yet, in cloudy days, the diurnal variability of sap flow is smoother under T1 and T2. The transpiration of tomato under different water supply differs greatly. The transpiration under the water stress is less than under normal water supply. It shows that the transpiration gets lower as less water is supplied. With the days increasing after irrigation, the difference between different water irrigation is gradually reduced, and the decrease of leaf water potential occurs, the leaf water potential is $T1 > T2 > T3$. In addition, the correlative analysis indicated that solar radiation, air temperature and relative air humidity (RH) are the main meteorological factors affecting sap flow rate of the tomato. The study also indicated that a postive correlation exists between the sap flow and solar radiation, air temperature and soil moisture. On the contrary, a negative correlation between the sap flow and leaf water potential and the relative air humidity (RH). The results provide scientific basis for the water management of tomato.

Key words: Tomato; Sap flow; Water potential; Water stress

水分胁迫对番茄叶片光合特性和叶绿素荧光参数的影响^{*}

张婷华¹, 杨再强^{1,2}, 李永秀¹, 朱凯¹, 彭晓丹¹, 赵翔¹

(1. 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室 南京 210044;

2. 南京信息工程大学应用气象学院 南京 210044)

摘 要:以番茄“金粉2号”品种为试材,在南京信息工程大学试验温室内设计4个土壤水分处理,研究了不同水分处理对番茄叶片光合特性和叶绿素荧光参数的影响。结果表明:(1)水分胁迫下番茄叶片的叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素含量呈规律性变化:CK>T1>T2>T3。(2)不同水分处理下番茄叶片的光响应曲线存在差异,随着土壤水分的减小,番茄叶片的 $P_{\max}$ 、 A_q 、 LSP 减小,而 LCP 增加。(3)与对照相比,水分胁迫下番茄叶片的 F_o 升高, F_m 、 F_v 、 F_v/F_m 下降;水分胁迫还抑制了 Φ_{PSII} ,使 ETR 降低, N_{PQ} 升高。(4)相关分析表明,各处理下番茄叶片的 $P_{\max}$ 、 A_q 与土壤水分呈负相关; LCP 、 F_o 、 F_m 和 F_v 与土壤水分均呈正相关。

关键词:番茄;水分胁迫;叶绿素荧光;光合作用

番茄是我国最主要的设施作物之一。温室土壤水分直接影响番茄的生长发育、产量和品质。如果土壤水分过低,番茄就会遭受干旱胁迫,造成生长不良。因此,如何控制土壤水分已经成为设施番茄生产中最为关键的技术问题。水分胁迫对光合作用影响很大,会引起光能过剩,对光合器官产生潜在的危害,破坏植物叶绿体光合机构。水分胁迫对植物光合作用的影响,可以通过借助叶绿素荧光动力学方法进行研究。叶绿素荧光(chlorophyll fluorescence)动力学技术是一种以光合作用理论为基础,利用植物体内的叶绿素作为天然探针,研究和探测其光合生理状况及各种外界因子对其细微影响的新型植物活体测定和诊断技术^[1]。

近年来,国内外关于用叶绿素荧光动力学方法研究水分胁迫对植株影响的报道很多,IA Hassan^[2]对小麦进行了干旱和高温胁迫,结果表明,胁迫引起叶绿素含量(Chl)、 $PSII$ 的最大光化学效率(F_v/F_m)、光化学猝灭系数(QP)和非光化学猝灭系数(NPQ)的下降,从而导致小麦产量的降低。国内人们利用荧光分析方法研究了水分胁迫对葡萄砧木^[3]、红花玉兰^[4]、茶树^[5]等作物的影响。

目前,关于水分胁迫对设施番茄光合作用特性及叶绿素荧光参数的影响报道较少。本文在番茄不同发育时期进行水分胁迫,系统研究了水分胁迫下番茄的光合作用特性及叶绿素荧光动力参数,为设施番茄的科学栽培提供一定依据。

^{*} 本文已发表于《灌溉排水学报》2013年06期。

1 实验材料与方 法

1.1 实验设计

试验于 2012 年 3—6 月在南京信息工程大学试验温室(Venlo 型)内进行。试验温室顶高 5.0 m、肩高 4.5 m、宽 9.6 m、长 30.0 m,南北走向,室内有补温设施,土壤为中壤土。以番茄“金粉 2 号”品种为试材,于 4 月 5 日在温室中整畦定植,畦长 8 m,宽 1 m,每畦栽两行,行距 30 cm,株距 40 cm。定植时严格选苗,秧苗处于三叶一心至四叶一心,定植时浇底水,水渗后用细土封穴。依据番茄的生长发育特点,试验在番茄苗期和开花坐果期进行,整个试验期间设置四个水分处理,对照 CK(田间最大持水量的 75%~80%);轻度胁迫 T1(田间最大持水量的 55%~60%);中度胁迫 T2(田间最大持水量的 40%~45%);重度胁迫 T3(田间最大持水量的 25%~30%)。各处理之间用埋深 60 cm 的塑料薄膜隔开,以防水分互渗,灌溉方式为浇灌。试验期间各处理 20 cm 土层土壤水分的平均体积含水率分别为:CK 为 40.65%,T1 为 34.59%,T2 为 26.00%,T3 为 21.06%。

1.2 实验内容与方 法

1.2.1 测定内容

(1)土壤水分测定:采用土壤含水率测定仪(EM50,USA),测定各处理土壤深度 20 cm 的土壤含水率,每隔 1 小时自动测定记录一次。根据测定结果,换算出体积土壤含水率,对各处理补充相应水分。

(2)叶绿素含量的测定:选取每棵植株上的成熟叶 1~2 片,称重、剪碎,在抽提液中(乙醇:丙酮:水=4.5:4.5:1)避光浸泡 1 d 后,取浸出液采用分光光度法测定 OD 值^[6],每个处理重复 3 次。

(3)光合参数的测定:试验期间,选择外界光强和空气湿度相对稳定的阴天,取从上往下数第 3 节位成熟叶,用 LI-6400 便携式光合作用测定系统在上午 9:00—11:00 间测定番茄的叶片光合特性,每个处理重复测定 3 次,同时测定光响应曲线。测定时设计 CO₂ 体积分数为 (380±10)×10⁻⁶,光强梯度设计:2000、1600、1400、1200、1000、800、600、400、200、100、50、0 μmol·m⁻²·s⁻¹ 共 12 个水平,光响应曲线测定由 LI-6400 内置程序自动完成。

(4)荧光参数的测定:选取与测光合参数相同部位的叶片,暗适应 30 min 后用双通道 PAM-100 测量系统(Dual-PAM-100)测定叶绿素荧光动力学参数。包括 F₀ (最小荧光强)、F_m (最大荧光强)、F_v (可变荧光)、PS II 的最大光化学效率(F_v/F_m)、PS II 的光化学量子效率(Φ_{PSII})、电子传递速率(ETR)和非光化学猝灭系数(NPQ)等叶绿素荧光参数。测定时光照强度为 600 μmol·m⁻²·s⁻¹,CO₂ 浓度为(400±10) μmol·m⁻²·s⁻¹,温度(25±1)℃,每个参数的测定进行 3 次重复,取平均值。

1.2.2 计算方法

绘制光合作用的光响应曲线(Pn-PAR 曲线),在光强为 0~200 μmol·m⁻²·s⁻¹ 范围内,通过线性回归求出光响应直线方程的斜率,即表观量子效率(A_q)。利用直角双曲线型的数学表达式^[6],可以计算番茄的光饱和点(LSP)和光补偿点(LCP)。