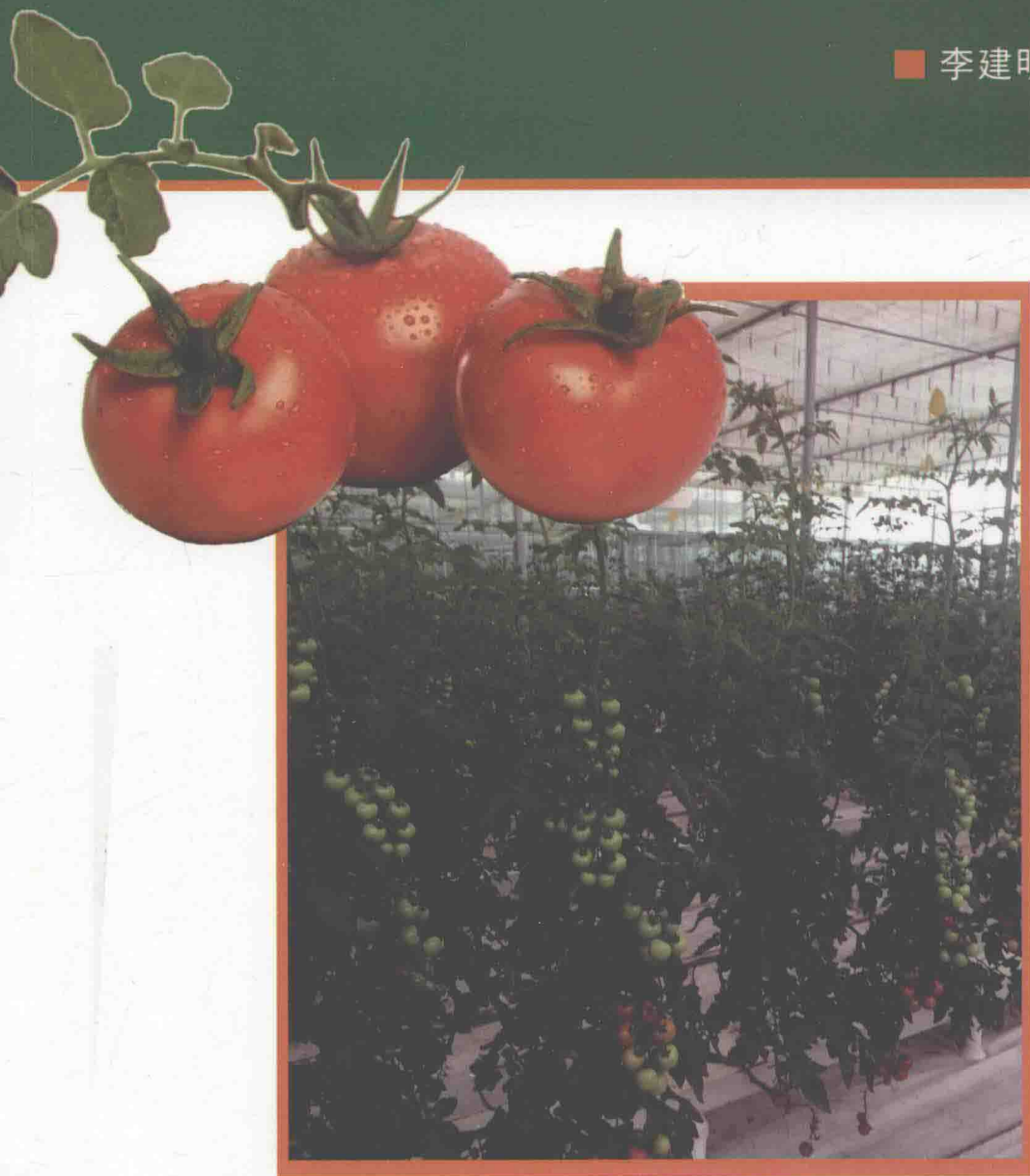


# 温室番茄甜瓜 水肥技术研究

■ 李建明 著



中国科学技术出版社  
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

# 温室番茄甜瓜水肥技术研究

李建明 著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

温室番茄甜瓜水肥技术研究/李建明著. —北京:  
中国科学技术出版社, 2015. 5

ISBN 978 - 7 - 5046 - 6883 - 7

I. ①温… II. ①李… III. ①番茄 - 温室栽培 - 肥水  
管理 - 研究 ②甜瓜 - 温室栽培 - 肥水管理 - 研究  
IV. ①S626.5 ②S627.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 113413 号

---

责任编辑 付万成 高立波

封面设计 小 夏

责任校对 杨京华

责任印制 张建农

---

出 版 中国科学技术出版社

发 行 科学普及出版社发行部

地 址 北京市海淀区中关村南大街 16 号

邮 编 100081

发行电话 010 - 62103130

传 真 010 - 62179148

投稿电话 010 - 62103165

网 址 <http://www.cspbooks.com.cn>

---

开 本 787mm × 1092mm 1/16

字 数 600 千字

印 张 25

版 次 2015 年 8 月第 1 版

印 次 2015 年 8 月第 1 次印刷

印 刷 北京长宁印刷有限公司

---

书 号 ISBN 978 - 7 - 5046 - 6883 - 7/S · 586

定 价 80.00 元

## 内容简介

蔬菜是人们生活必需的副食品，随着我国社会经济的不断发展，人民生活水平的逐步提高，人们生活需求已由过去的满足温饱型向营养保健型转变。对蔬菜的需求不仅要求有充足的数量，而且更注重“新鲜、优质、营养、安全、方便”。设施蔬菜生产是实现蔬菜周年供给、增加单位面积产量、提高生产效益、适应我国土地资源现状的重要产业，近30年来得到了迅速发展，但由于存在低温弱光、水肥利用率低、土壤盐渍化、病虫害频发、缺乏作物生长与温、光、水、气等的综合环境控制理论和技术依据等问题，抑制了设施蔬菜产量和品质进一步提升，严重抑制我国设施农业生产的健康、可持续发展。

针对上述这些问题，笔者课题组以设施蔬菜水分高效利用为核心，在设施蔬菜（甜瓜、番茄）栽培模式、水肥一体化技术体系及设施蔬菜水分循环机理与模拟理论方面进行了系统的研究与深入探讨，以期提出不同温室环境下设施蔬菜水分生理生态变化机理与灌溉技术指标，为温室环境与蔬菜作物生长发育特点进行设施蔬菜智能化管理提供理论依据。

本书突破了传统研究成果单线式布局的教材框架，共分三大篇，每篇又按照研究方向的不同分成不同章，各篇、章、节均对其进行归纳总结，起到了提纲挈领的效果，便于读者的阅读与快速理解，有利于读者在掌握设施生理及模型研究方法、了解当前设施生理研究动态的同时，获得一些必要的设施栽培技术知识。

本书汇编了笔者课题组近十年来研究论文，详尽地概括与总结了设施番茄、甜瓜的生理生态及模型研究方面成果。全书分为四部分：绪论主要

介绍了水分与植物生长发育、光合作用、养分吸收与分配的关系；我国设施栽培及无土栽培发展显著与趋势等内容；第一篇生理基础篇，主要介绍了水或肥对亚低温下设施作物形态、生理、抗氧化酶系统及养分吸收与分配等方面的影响；第二篇水肥耦合篇，涵盖内容范围较广，主要涉及温室番茄甜瓜水肥管理、基质配比研究及环境调控方面，是设施蔬菜栽培技术的重点与难点，重在理论与实践相结合。主要介绍了不同栽培模式下水肥供应对番茄生长发育及产量的影响、土壤栽培下水肥供应对甜瓜生长发育及产量的影响、不同基质比对设施作物生长发育及产量的影响和不同温室环境下水肥对作物生长发育的影响。第三篇作物模型篇，主要介绍了作物形态模型、光合模型、蒸腾模型等温室作物生长发育模型，旨在揭示作物生长发育与环境变化之间的规律，为创造作物良好的生长发育环境提供理论指导，是设施作物生理研究的一个延伸方向。

## 序

近十余年来，建明同志及其所领导的课题组一直在从事设施蔬菜水肥高效利用研究。以设施蔬菜主要作物番茄、甜瓜为研究对象，从作物生理、水肥耦合，以及作物模型三个方面进行了较为深入的研究，通过大量试验，获取了丰富的试验数据，取得了较为系统的研究成果。本书在理论上是对作者对其工作的总结、提炼与集成。

通读本书，感觉有以下三个特点。一是研究思路清晰。从作物水与生理，到作物水肥耦合，再拓展到作物模型，逐步深入。二是试验数据丰富。作者不仅做了大量的田间试验，取得了较为丰富的试验数据，而且其研究分析均以第一手试验数据为支撑，科学性高，可信度高。三是理论与实践相结合。作者不仅进行了大量的试验和理论研究与分析，更重要的是在理论研究的基础上，形成了若干技术规范，如设施番茄膜下滴灌与嫁接培水肥一体化管理技术规范，设施番茄越冬长季节基于嫁接水肥管理

三年事，这对指导生产具有重要意义。

建明同志在~~该~~工作期间与我合作，  
双方相互较为了解，此次由我在其著作序，  
甚慰。写下如此文字，以作纪念，也作为庆  
贺。对建明同志在此领域作出之大  
贡献，也为同仁们推荐此书，并托出者  
予建议，其书命名为《~~著作~~》为大宗工作提供  
一些启示与参考。

中国科学院植物研究所  
研究员 中心主任。

中国科学院植物研究所  
研究员 主任。

白景

二〇一五年

# 前 言

设施农业是指利用一定的设施及设备,最大限度地改善自然环境,创造出适宜于动植物生长发育的生境条件进行种植或养殖的一种农业生产方式。设施农业集成了现代生物技术、农业工程、环境控制、管理、信息技术等学科,以农业生物学特点为核心,以现代化农业设施为依托,具有科技含量高、产品附加值高、土地产出率高和劳动生产率高的特点,是现代农业的代表与体现,也是传统农业向现代化农业发展的需要。设施农业的发展能够大幅度提高作物产量,一般是露地生产的5~10倍之多;是开发非耕地,解决耕地资源短缺的重要途径之一;是提高农业抵御自然灾害的重要措施。发展设施农业可显著提高土地利用率、产出率及劳动生产率,适应我国未来农业与社会经济发展的需要。

近20年来,我国设施农业迅猛发展。到2013年,我国设施蔬菜总面积约为400多万公顷,年生产蔬菜约为6亿吨,为保障我国北方地区冬季蔬菜正常供给、丰富全国周年蔬菜市场种类、提高蔬菜的生产水平、生产能力及抵御自然灾害的能力,以及对改善全国人民生活水平起到了极其重要的作用。但是,由于我国农业农村经济条件的限制,目前我国温室大棚等设施结构还相对简陋,温室大棚没有加温设备,或者虽然配置有加温设备,但是为了降低生产成本,加温温度不够,温室大棚在冬季仍然长期处于一种亚低温状态,低温弱光成为我国北方地区温室蔬菜生产的主要问题之一;设施蔬菜面临的第二个突出问题是设施菜田土壤盐渍化、连作障碍等问题。由于土壤盐碱化,设施蔬菜产量的不断降低、设施施肥量不断增大;连作障碍问题的存在需要采取嫁接等措施,无形中导致了设施蔬菜生产成本的上升与产品品质降低,失去了原有的风味。设施蔬菜面临的第三个问题是设施环境的水肥调控的技术研究。由于缺乏有效的水分管理技术规程体系,温室环境湿度过大导致病虫害频繁发生。

2001年至今,笔者所在课题组以设施蔬菜水肥高效利用为核心,开展了有机无土栽培与土壤栽培水肥一体化技术体系研究、亚低温下蔬菜水分生理生态变化机理与灌溉技术指标研究和设施蔬菜水分循环机理与模拟理论研究,以此达到克服设施土壤连作障碍、优化设施蔬菜水分环境、减少病虫害,实现依据温室环境与蔬菜作物生长发育特点进行设施蔬菜智能化管理的目标。通过以上研究形成的大部分技术得到推广应



用，产生了显著的经济和社会效益。例如温室番茄、甜瓜等蔬菜有机袋式栽培和土壤栽培水肥一体化生产技术的应用，与当地农民传统生产模式相比较产量提高 90% 以上，水肥利用效率提高 100% 以上，产品品质显著提高。

本书是笔者在汇整本课题组近十年来发表的大部分论文的基础上并对其按篇章分类详尽分析，力求在设施番茄、甜瓜的生理生态及模型研究方面进行比较全面的概括与总结的研究成果；它涵盖了设施环境调控（水肥、温湿度、气流速度等）、设施栽培方法（基质配比、沙地改良等）及作物环境模型等方面的研究，它既重生理基础研究，也重设施栽培实践，同时还将作物生理（蒸腾蒸发）与环境参数（温光水汽等）进行深入的数学模型模拟，旨在揭示作物生长发育与温室环境、土壤环境及人为栽培措施之间的相互关系，以实现作物的最终高产优质高效生产。此外，本书突破了传统研究成果单线式布局的教材框架，将全书分为三大篇，每篇又按照研究方向的不同分成不同章，各篇、章、节均对其进行归纳总结，起到了提纲挈领的效果，便于读者的阅读与快速理解，有利于读者在掌握设施生理及模型研究方法、了解当前设施生理研究动态的同时，获得一些必要的设施栽培技术知识。本研究先后得到国家自然科学基金、国家“十一五”“十二五”科技支撑计划、“863”计划、陕西省产业技术体系以及陕西省科技统筹计划等课题的经费支持，是经过历届研究生、博士生的辛勤工作取得的部分研究成果的汇整。在课题研究的过程中，得到西北农林科技大学吴普特教授、邹志荣教授、张富仓教授等多位老师的热心指导，在书稿的整理过程中，潘铜华、刘国英、杜清洁和常毅博等同学做了大量整理编制工作，在此一并表示感谢。由于我们的知识与研究水平有限，疏漏或研究不深入等问题一定存在，敬请各位批评指正。

李建明

2014 年 10 月

# 目 录

绪 论 .....	1
-----------	---

## 第一篇 生理基础篇

第一章 水分对番茄形态结构及植株水分含量影响的研究 .....	51
第一节 不同补充灌溉量对番茄幼苗生长的影响 .....	52
第二节 水分对亚低温下番茄根系形态及叶片结构的影响 .....	57
第三节 灌溉上限对番茄叶片水分含量的影响 .....	67
第二章 水分对番茄甜瓜叶片光合相关特性影响的研究 .....	73
第一节 水分对甜瓜光响应特性的影响 .....	74
第二节 水分对番茄不同叶龄叶片光合作用的影响 .....	80
第三节 水分对亚低温下番茄叶片光合及荧光动力学参数的影响 .....	91
第三章 水分对亚低温下番茄渗透调节物质及抗氧化特性的影响 .....	102
第一节 水分对亚低温下番茄幼苗渗透调节物质及抗氧化特性的影响 .....	103
第二节 水分对亚低温下番茄开花结果期生理代谢的影响 .....	109
第四章 水分肥料对亚低温下番茄营养元素吸收分配效应影响的研究 .....	116
第一节 水分对亚低温下番茄幼苗养分吸收的影响 .....	117
第二节 钾肥对亚低温下番茄幼苗养分吸收及分配的影响 .....	128
第三节 不同硝态氮/氨态氮比例对亚低温下番茄幼苗氮代谢的影响 .....	132

## 第二篇 水肥耦合篇

第五章 不同栽培模式下水肥供应对番茄生长发育及产量的影响 .....	141
第一节 温室番茄节水灌溉指标的研究 .....	142
第二节 水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响 .....	146
第三节 不同氮钾肥水平对温室番茄生长发育和产量的影响 .....	156
第四节 水肥耦合对温室袋培番茄产量和品质的影响 .....	162
第五节 水肥处理对温室袋培番茄养分吸收和分配的影响 .....	172
第六章 土壤栽培下水肥供应对甜瓜生长发育及产量的影响 .....	186
第一节 水氮耦合对大棚甜瓜产量和品质的影响 .....	187

第二节	水钾耦合对大棚厚皮甜瓜产量和可溶性固形物含量的影响 .....	196
第三节	根系分区水肥耦合对大棚甜瓜产量和品质的影响 .....	204
<b>第七章</b>	<b>不同基质配比对设施作物生长发育及产量的影响 .....</b>	<b>214</b>
第一节	日光温室甜瓜沙化土有机配方研究 .....	215
第二节	不同配比有机基质养分转化与甜瓜生长发育关系 .....	222
第三节	羊粪与麦秸混合腐熟物含量对日光温室沙培甜瓜品质的影响 .....	228
第四节	番茄育苗基质理化特性及其对幼苗生长影响的研究 .....	233
第五节	基质配方与灌水量对温室甜瓜生长及品质的影响 .....	242
<b>第八章</b>	<b>不同温室环境下水肥对作物生长发育的影响 .....</b>	<b>249</b>
第一节	通风与氮钾肥对温室甜瓜生长及品质的影响 .....	250
第二节	不同通风量栽培对大棚番茄果实货架品质的影响 .....	258
第三节	温室温湿度及灌溉量对甜瓜生长发育的影响 .....	263
第四节	温室温湿度与灌溉量对番茄生长发育、产量及品质的影响 .....	271

### 第三篇 作物模型篇

<b>第九章</b>	<b>温室作物蒸腾及其影响因子分析模型研究 .....</b>	<b>301</b>
第一节	温室作物蒸腾模型研究基础 .....	302
第二节	温室作物蒸腾耗水规律研究 .....	312
第三节	温室作物蒸腾量影响因子分析 .....	317
<b>第十章</b>	<b>温室作物营养生长期日蒸腾量估算模型 .....</b>	<b>321</b>
第一节	多因素非线性回归与 BP 神经网络模型 .....	322
第二节	作物系数法模拟温室作物日蒸腾量 .....	335
第三节	利用水势差驱动原理模拟温室作物日蒸腾量 .....	341
<b>参考文献</b>	.....	<b>348</b>
<b>附 件</b>	.....	<b>382</b>

## 绪 论

随着种植业结构的调整,设施蔬菜种植面积逐年增大(吴明珠,2000)。番茄作为目前世界上种植面积最广、最受欢迎的蔬菜作物之一(Hebbar S S et al, 2004),其产量的高低受水肥管理影响较大(樊兆博等,2011;韦泽秀等,2009)。甜瓜也是设施主要栽培作物之一,然而瓜农对于甜瓜设施栽培的水肥管理的盲目性越发明显(李长勋等,2005)。大棚种植不同于露地,棚内空气湿度过高与土壤连作障碍一直是影响设施栽培的两大难题(李式军,2002)。采用节水灌溉、开创新的灌水方式与合理施肥等方法为解决上述问题的重要途径(刘巧真等,2012)。水分和肥料是影响作物生长发育和生产水平提高的重要物质基础,两者相互促进,相互制约(王晓娟等,2012;韦泽秀等,2010)。长期以来,设施蔬菜生产过程中水肥管理一直沿用着“粪大水勤,不用问人”的传统经验管理模式,普遍存在施氮过多的问题,每茬次施氮量一般成倍多于植株需求量(李俊良,2002),过量的氮肥引起了一系列的环境问题(高兵,2005)。这不但对作物生长发育不利,同时还将导致水肥利用率低和温室土壤盐渍化等问题,从而影响设施农业产业的健康发展(王朝辉等,2002)。研究水肥的合理利用,是实现水肥调控高效化、降低环境污染的一项综合技术。对水肥耦合技术深入研究,可以获得提高肥料利用率和水分利用率的科学依据,从而为实现科学灌溉和施肥的高效化管理提供理论指导(姚静等,2004),推动我国设施农业乃至世界农业的可持续发展。

我国北方地区沙化地面积广阔,有生产纯天然绿色甜瓜的理想条件(肖洪浪等,1999),但沙化土营养贫乏,化肥虽能使其有高产出,但大量使用会造成甜瓜中硝酸盐的积累(Brown J. R., Smith G. E., 1999),不能保证甜瓜品质;另外,化肥在沙化地中较低的利用率和较高的残留量对环境会造成较大污染。仅用农家肥作肥源在获得优质产品的同时还会获得较好的产量,更利于该地区农业的可持续发展。因此,将沙化地区洁净无污染的沙化土与腐熟农家肥结合起来,取长补短,进行园艺作物生产,具有重要的现实意义。我国各类作物秸秆生产量达7亿吨/年以上(李伟,2000),家畜粪尿20.4亿吨/年左右(宋秀杰,1997),资源化利用率却不足30%(杜静,2003),大部分被废弃,对环境造成严重污染。农业有机废弃物经

发酵后可用作无土栽培基质、辅助基质或肥源，因此有机土壤栽培已广泛应用于设施农业生产中，并取得了显著的经济、社会和生态效益（陈双臣等，2005）。

据研究，温室环境（如通风、光照、温湿度等）都会对设施作物的生长发育以及产量品质等产生影响。近年来，随着科技的发展与人们生活水平的日益提高，人们的无公害意识在进一步增强，对产品品质的要求也越来越高。然而在温室中栽培的作物，由于处在一个相对封闭的环境中（吉中礼，崔鸿文，1997），其与露地相比光照强度弱、空气湿度高、环境温度高、空气流动性差，这种环境条件不利于作物的生长发育。栽培中对温室进行通风不仅可以促进室内外环境之间物质和能量的交换，而且可以营造适宜的气流运动速度，满足作物生长对 CO<sub>2</sub> 浓度、空气湿度等相关因素的需求，进而影响果实货架品质。适宜的气流运动速度能够调节植物叶面微环境，促进微环境与周围环境的物质转移和能量交换，降低光合气体交换阻力、提高蒸腾速率、增加叶片微环境 CO<sub>2</sub> 浓度，同时减少叶片水分凝结，避免在高湿点产生病害，有利于作物的生长发育和提高抗逆性能（潘瑞炽，2001）。因此研究温室内作物生长发育与气流运动条件之间的相互关系，并进一步找出最佳的气流运动条件，对于改善温室作物生长环境，提高作物产量和改善产品品质具有重要的意义。

为此，本试验采用两种栽培模式（土壤栽培与基质栽培），主要探究，水肥供应对番茄、甜瓜生长发育、产量、品质及水分利用效率、养分吸收与分配等方面的影响，同时还就蔬菜节水灌溉指标、不同环境下（通风、温湿度）植株生长对水肥供应、基质配方、土壤改良等的响应开展了广泛研究。以深入了解不同栽培模式及不同环境下水肥供应对作物各生育期生长发育的影响，明确影响作物生长的各种环境因子之间的相互关系，为寻求最佳的水肥管理模式、实现设施作物高产优质高效栽培提供必要的理论支持与实践指导。

## 1 水分和低温对植物生长发育的影响

### 1.1 水分对植株生长发育的影响

土壤水分是作物生长发育重要的环境条件之一，不同作物以及同一作物的不同发育阶段对土壤水分的需求不同。叶片膨压高低、形状、大小、可作为判断植株水分状况的依据（Passioura，1983）。苗期的轻度干旱能提高植株的抗旱能力（蔡焕然，2000）。植株蒸腾蒸发量受温度、湿度、光照和通风情况等环境因素影响。补充不同蒸腾蒸发量的水分影响番茄幼苗的生长，补充 100% 蒸发量的水分时，番茄幼苗的株高和茎粗最大（郭永清，2010），叶片生长指数、植株干质量、壮苗指数

最大，番茄幼苗的生长状况最好。王秀峰等（1992）研究认为，土壤含水量为65%~85%时，番茄幼苗的茎粗、叶面积较大。曾春芝等（2009）用蒸发皿水面蒸发量为依据估算作物需水量来研究甜瓜耗水规律，结果表明随灌水量的增加，茎粗和叶面积增加，植株在K0.8处理下最高。李清明等（2005）认为初花期黄瓜株高和茎粗分别在田间持水量的100%和90%达到灌溉上限时最大。黄瓜生长受土壤水分状况影响显著，随土壤含水量的增加，黄瓜株高和叶面积增加，土壤含水量为田间持水量的90%，幼苗茎较粗，长势健壮（冯嘉明，2005）。土壤含水量为田间持水量86%~90%时，茄子生长旺盛，茎秆粗壮，各处理茎粗的增长量随生长时间的增加而增粗，但并非随土壤含水量增加而增大（陈修斌，2009）。

水分胁迫会引起植物的形态发生改变，尤其是叶片和根系在生长过程中对水分的敏感度很高，从现有的研究结果可以看出，叶片和根系的形态变化以及空间分布与土壤的水分供给息息相关。植物叶片对水分的适应性变化，形态上主要表现在叶片总面积的减少，尤其是新生叶的生长速率减缓、叶片的扩展生长提前停止。有实验结果表明长期的水分胁迫会导致基部叶片叶缘的干枯、脱落，叶面积减少可以减少叶片的叶片萎蔫，通过改变叶片的方位来减少太阳的直接辐射，以此来减少蒸腾失水。这些形态变化都是暂时的，一旦干旱胁迫解除，叶片又能恢复到常态，但是如果干旱胁迫程度严重或者持续时间较长，也会对叶片产生不可逆的破坏。根系从土壤中吸收水分满足自身的水分需求，同时将水分通过木质部运输到叶片满足叶片的生长需要，叶片通过光合作用和蒸腾作用进行物质转换。在干旱条件下植物同样通过调节根系形态或者分布来提高对土壤的吸水能力。有研究表明，当植物受到水分胁迫时，根系感知并发出信号，通过木质部传输到叶片，如气孔关闭、叶片水势下降等（朱维琴等，2002）。

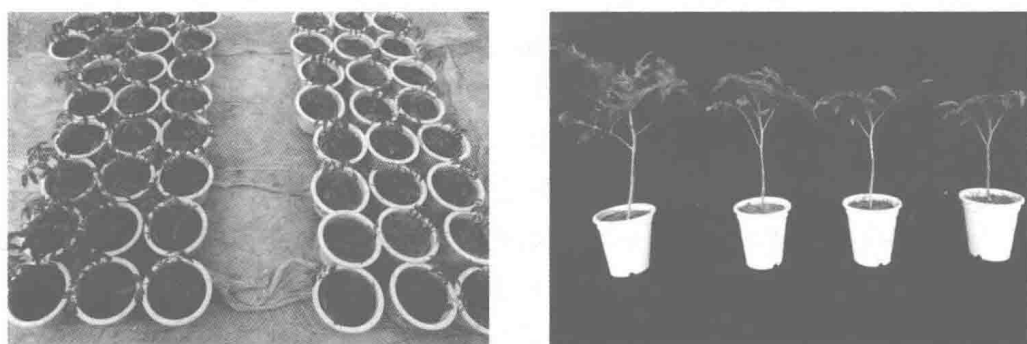


图1 亚低温下水分胁迫对番茄生长的影响

前人研究表明，土壤水分亏缺对植物生长影响较为明显，即使是轻度干旱胁迫，如果持续时间较长，也会对植物生长产生明显的影响。这种影响在形态上表现为抑制植株株高、新分枝数、叶片数量及单叶叶面积等（Guo等，2007；Masinde等，2006）。有研究表明，在一定范围内，植物叶面积的大小与水分供给呈正相关关系。

李清明等（2005）对灌溉上限的研究表明：初花期的黄瓜叶面积随灌溉上限的增加而增加，在灌溉上限为田间持水量 90% 时达到最大值。郭永青等（2010）进行了补充灌溉处理试验，研究了番茄幼苗生长变化与不同水分处理的关系，发现补充腾发量的 80% 和 120% 均没有补充 100% 时对番茄生长的效果好，100% 补充时番茄植株的各形态指标达到最大值。其他研究也得出了相似结果，对番茄的形态指标进行研究发现，随着土壤含水量的减小，植株的株高和叶片大小也随之减小（陈年来等，2009；韦莉莉等，2005）。冯嘉玥等（2005）研究表明当土壤含水量为田间持水量 90% 时，黄瓜的叶面积随着土壤含水量的增加而增加。张淑兰等（2009）研究表明，随着干旱处理程度的增加，黄瓜幼苗的株高低于正常灌水处理，黄瓜总叶面积和叶片数随着处理时间的延长先降后升。郝树荣等（2005）指出在中度干旱条件下，水稻的生长缓慢，单株叶片数和最大叶面积相对减少。陈亚飞等（2009）对干旱胁迫下普陀樟幼苗进行形态观察发现叶片萎蔫、失去绿色发黄、缺水变枯。

根系作为植物从土壤中吸收水分和矿质营养的主要部分，根毛是其吸收和运输的主要器官（Blouin 等，2007）。根系的生长发育会受到土壤水分和温度的影响，根系发育的好坏尤其是细根发育的强弱直接影响到矿质营养运输到地上部分叶片的进程，最终影响到植株的整个生长发育（Inukai，2004）。自从 Weaver（1919）首次公布根系和生态关系的研究成果以来，学者对植物的根系展开了广泛的研究。不同的水分条件下植物根系会呈现不同方向的生长，既有水平方向又有垂直方向的生长（Smit 等，1994），此外，根长、表面积、活跃面积、具有强烈吸收能力的细根数量也随水分状况的不同而表现出不同的变化（林旭，2006）。王秋菊（2009）对水稻进行干旱胁迫研究结果表明，适当的水分胁迫对根系的生长是有利的，能够增加根系的长度，加大与土壤接触的深度，便于根系在垂直方向上吸收更多的水分。

马旭凤等（2010）对玉米进行干旱胁迫研究结果表明，随着水分亏缺的严重，玉米根系总长度减少、根系平均直径减小。徐洪伟等（2009）研究结果指出，在水分胁迫条件下不同发育时期的玉米根系根长、表面积、体积等都会出现明显的下降。郭相等（2001）研究表明，苗期水分胁迫可以使植物单株根条数随着亏水程度的严重而不断减少，但是却促进了平均根长的上升，有利于促进后期果实籽粒的形成。当土壤中缺水时，植株会通过增加根系的长度尤其是细根的数量来应对水分亏缺（冯广龙 1998）。杨恩琼等（2009）通过高油玉米 115 为试材，研究指出干旱胁迫抑制了根系的生长，其中对根长的影响超过对生物量的影响。不同方式的干旱胁迫对植物的影响是不一样的，李博等（2008）发现，渐进干旱时，田间持水量为  $35\% \pm 5\%$  时根系生长最差，田间持水量  $55\% \pm 5\%$  时根系生长最好；若采用直接干旱方式，田间持水量在  $75\% \pm 5\%$  时根系生长优于田间持水量  $55\% \pm 5\%$ ，田间持水量  $35\% \pm 5\%$  时根系生长仍为最差。李博等还发现了干旱时细根（直径  $0.05 \sim 0.25\text{mm}$ ）

保持着明显的生长优势，中等根（直径 0.25 ~ 0.45mm）和粗根（直径 > 0.45mm）的绝对优势丧失。根系直径越小，在干旱条件下受到的胁迫程度越大，同样根系直径较大时，自身的生长发育已经建成，能够在一定程度上缓解干旱胁迫对其的不利影响，原因是干旱使细根的相应比例下降，而其他的相应比例上升。宋凤斌等（2004）的研究也表明苗期土壤干旱会导致幼根直径的减少，导致根表面积下降。

## 1.2 温度对植株生长发育的影响

植物的生命活动与温度有密不可分的关系，它影响着植物的生长发育、养分和水的吸收以及光合作用、呼吸作用、同化物的运输分配，与植物体内一切的生理活动有关，是植物生命活动最重要的环境因子。不同的植物有不同的温度三基点要求，设施栽培应尽可能地使温度环境处在园艺植物对温度三基点和生长阶段的要求，才能实现优质高产。

幼小的植株与长成的植株对温度的需求是不同的（张福曼，2010），苗期的温度管理直接影响后期的生殖生长、果实品质以及产量。番茄是喜温性蔬菜，番茄生长发育的适宜温度为 18 ~ 30℃，温度低于 15℃，不能开花或授粉受精不良，甚至落花落果，8℃左右时生长量的增加缓慢，下降到 5℃茎叶伸长停止。番茄幼苗最适宜的生长温度范围为 18 ~ 23℃，亚低温处理后，壮苗指数和叶片生长指数明显降低（徐菲，2013）；株高、茎粗生长受到抑制，对株高的影响大于对茎粗的影响，而茎粗较株高对亚低温更为敏感（李国强，2006）。低温处理后，番茄花序的花朵数目减少，坐果率降低，畸形果率升高，最终造成产量降低、品质下降（姜晶，2010）。甜瓜幼苗长出 5 片真叶时，雌花开始分化，此时的温度管理对雌花品质的影响很大，会波及后期的坐果率和果实发育（Mccord，1960）。16℃降低了黄瓜幼苗的株高、茎粗、叶面积（任志雨，2003），所以优质的幼苗是丰产的基础，因此在生产中要充分注意苗期温度管理。



图2 亚低温对番茄生长发育的影响



低温下植株的高度和根系长度受抑制，影响程度取决于品种和低温逆境的强度（Elsteref等，1994）。冬茬黄瓜，植株节间长，叶片稀疏，同化产物大多输向茎叶，果实发育慢（陈青君，1996）；长期夜间亚低温也会使番茄果实的发育速度减慢（李天来等，2008），平均单株产量降低，但果实干重会增加（熊作明等，2007）；设置适当的亚低温，果实品质得到改良（Ventura，1989）。温度关系到植物的整个生长过程，植物所有的生物学进程几乎都受其影响。温度的高低与根系吸水、叶片光合同化作用关系密切，植物生长发育的好坏在很大程度上取决于是否有适宜的温度（佟亚辉等，2008）。由于季节性的变化，植物不可避免地受到低温逆境的影响。植物在长期的温度逆境环境中也会逐渐形成对寒冷条件的适应性，但是当遭遇突然低温或者持续时间延长时，植物的抗逆性优势就会丧失。

根际土壤温度对根系生长发育、形态结构以及根系生理指标变化等各种代谢过程起着重要的作用。当土壤温度降低时，植物根系吸水能力减弱，束缚水含量相对升高，减少自由水含量，避免细胞的结冰，目前关于根际温度对根系影响的研究很少。程建峰等（2000）研究表明，水稻生长前期的根系建成和发育过程以及后期的根系衰老变化都与温度有关。根系在生长发育过程中，不仅受到土壤温度的影响，同时也受到积温对其的影响，温度对根系的形态特性的影响主要是通过影响根系的总表面积来完成的，根系总表面积的变化规律与根系体积一致。番茄为喜温蔬菜，当土壤温度低于 $8^{\circ}\text{C}$ ，根系停止生长，低于 $6^{\circ}\text{C}$ 时，根系开始腐烂，当土壤温度为 $22^{\circ}\text{C}$ 时，根系生长良好，便于从土壤中吸收营养与叶片进行同化作用，最大程度的促进协同增长。植株苗期的温度对根系的影响比后期的影响更敏感，苗期植株处于生长旺盛期，此时一定范围的低温易造成植株生育减缓，对成熟期根系生理活性的影响程度大于苗期的高温对后期根系生理活性的影响。Nielsen（1974）研究认为，当根系处于适于生长的较低温度时，不利于根系的生长，但是却对根系活性有较大幅度的提高，延长根系的生理年龄。吴岳轩（1995）的试验研究也验证了上述结论。当环境处于低温期时，大量灌水会引起地温的下降，使得设施内温度长期得不到恢复而影响番茄的生长发育（刘海利，2006）。崔翠等（2012）研究表明，不同品种的烤烟在低温处理2d后根系的形态变化是不一致的，两个品种在处理初期根系平均直径、根表面积和根体积均有不同程度的下降，但耐寒性品种随着胁迫时间延长又恢复正常。曹宁等（2009）对低温条件下的玉米根系生长进行试验，指出低温处理玉米根系的形态指标较之常温对照处理明显下降，但不同抗性品种对温度的反应程度迥异。辣椒根系随着温度的降低总长度减少，根系体积在一定低温条件下升高，随着低温的降低又呈下降趋势（任旭琴，2007）。