

网络出版时间:2014-11-04 15:03

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.12.020

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.12.020.html

我国日光温室小气候研究进展与展望

魏瑞江^{1,2}, 孙忠富³

(1 河北省气象科学研究所, 河北 石家庄 050021; 2 河北省气象与生态环境重点实验室, 河北 石家庄 050021;

3 中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

[摘要] 简要回顾了我国日光温室的发展历程, 将日光温室小气候研究划分为 3 个阶段: 20 世纪 80 年代的起步阶段、90 年代的探索发展阶段及 21 世纪的快速发展阶段。从日光温室小气候监控、小气候变化规律、小气候模拟、温室内小气候与外界的关系、小气候预报、小气候对蔬菜生长发育的影响、小气候调控等 7 个方面, 介绍了日光温室小气候研究的主要成果和进展; 从设施农业可持续发展及生产需求、农业气象业务发展需求、日光温室小气候研究存在的薄弱环节等方面, 提出立足防灾减灾的日光温室小气候监测预测技术研究、立足气候资源优势的小气候高效利用技术研究、立足农业气象业务发展的小气候定量分析评估技术研究、立足节能降耗和低碳生产的小气候调控技术研究等, 将是未来日光温室小气候研究的重点和热点。

[关键词] 日光温室; 小气候; 研究进展

[中图分类号] S162.4⁺1

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2014)12-0139-12

Development and perspective of research on microclimate of sunlight greenhouse in China

WEI Rui-jiang^{1,2}, SUN Zhong-fu³

(1 Institute of Meteorological Science in Hebei, Shijiazhuang, Hebei 050021, China; 2 Meteorological and Eco-environmental Key Laboratory in Hebei, Shijiazhuang, Hebei 050021, China; 3 Institute of Environment and Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: This paper briefly reviewed the development history of sunlight greenhouse in China. The research on microclimate of sunlight greenhouse was divided into three stages: the initial stage in the 1980s, the exploration and development stage in the 1990s, and the rapid growth stage since the beginning of the 21st century. The main achievements and development of microclimate of sunlight greenhouse were introduced based on seven respects: monitoring of sunlight greenhouse, microclimate change laws, simulation of microclimate, relationship between inside and outside of microclimate, forecasting of microclimate, microclimate influences on vegetable growth as well as microclimate regulation and control. From the perspective of energy saving and low carbon producing etcetera, sustainable development of facility agriculture and its productive demands, the needing of agro-meteorology business development as well as the weak aspects in the research of microclimate of sunlight greenhouse, key points and hot spots of microclimate of sunlight greenhouse in future were proposed. The key points and hot spots included the researches on monitoring and forecasting technology of microclimate of sunlight greenhouse based on disasters prevention and reduction, high efficient utilization study of microclimate based on advantages of climate resources, quantificational assessment of microclimate based on development of agro-meteorology business, and regu-

[收稿日期] 2014-03-10

[基金项目] 公益性行业(气象)科研专项“华北日光温室小气候资源高效利用技术研究”(GYHY201306039)

[作者简介] 魏瑞江(1966—), 女, 河北晋州人, 正研级高工, 硕士, 主要从事设施农业气象研究。E-mail: weirj6611@sina.com

lation and control techniques of microclimate.

Key words: sunlight greenhouse; microclimate; development of research

我国日光温室发展迅速,日光温室蔬菜生产给人们带来了可观的社会效益和经济效益。由于日光温室的相对封闭性,决定了其内部的小气候不同于外界环境的大气候,但实际又受到外界大气候的巨大影响。同时,日光温室内的的小气候直接影响着温室内蔬菜的生长与发育,所以人们对日光温室小气候进行了较多研究。为了了解并借鉴前人的研究成果,以便于更好地开展相关研究和应用,本研究简要回顾了我国日光温室的发展历程,重点阐述了国内在日光温室小气候方面的研究进展,探讨了未来我国日光温室小气候研究的重点和方向,以期对设施农业防灾减灾、农业增产增收增效和农村经济可持续发展奠定基础。

1 日光温室发展历程

日光温室是以太阳能为主要能源,夜间采用活动保温被对前屋面保温,进行越冬生产的单屋面塑料薄膜温室^[1]。日光温室 20 世纪 80 年代初发源于辽宁海城,20 世纪 80 年代末期经瓦房店传往山东、河北等地,后在东北、华北、西北等地区广泛应用。

日光温室的发展经历了 4 个阶段:一是初创时期,从 20 世纪初开始,一直延续到 20 世纪 80 年代,主要是土木结构的玻璃温室;二是大规模发展初期,从 20 世纪 80 年代初期到末期,日光温室前屋面覆盖材料由玻璃改为塑料薄膜,实现了北纬 40°~41°地区在完全不加温的条件下,利用塑料日光温室进行越冬黄瓜的种植;三是全面提升与发展期,从 20 世纪 90 年代初期到 21 世纪初期,日光温室面积快速发展,结构性能和配套技术也逐步优化和跟进,实现在最低气温 -25℃地区,通过对温室进行少量加温而能够生产喜温果菜并获得高产;四是现代化发展期,从 21 世纪初期开始至今,日光温室朝着自动化、机械化、规范化、无害化、标准化方向发展^[2]。有关日光温室小气候的研究也随着日光温室的兴起而开始。

2 日光温室小气候研究进展

日光温室小气候包括温度、湿度、接受到的太阳辐射、二氧化碳等。自 20 世纪 80 年代开始,针对日光温室小气候的研究就已经展开,可以分为 3 个阶段:20 世纪 80 年代的起步阶段、90 年代的探索发展

阶段、21 世纪的快速发展阶段。

2.1 小气候自动监控技术研究

对日光温室内小气候的实时监控,是日光温室生产走向工业化、自动化、产业化的必由之路,是实现温室生产高产、优质、高效的关键,也是做好气象为设施农业服务这一工作的基础。

最初对温室内小气候的监控普遍采用人工方式,如用传统的温、湿度计记录温室内的温度和湿度,甚至仅凭生产操作人员的感觉,采用人工扒缝通风或多层覆盖的方法,达到控制室内温、湿度的目的。

我国温室自动控制技术研究开始于 20 世纪 80 年代,在 90 年代,中国农业科学院、中国农业大学、吉林工业大学、江苏理工大学等单位从不同角度研究了温室内的计算机控制与管理技术,这一阶段我国温室小气候的监控技术研究主要从消化吸收、简单应用向实用化、综合性研究应用阶段过渡和发展^[3]。进入 21 世纪,一些农业科研院所和大学加大了对温室内小气候自动监控技术的研究,集传感技术、自动检测技术、通讯技术和微型计算机技术于一体,实现了对温室内小气候的自动监控。如中国农业科学院研制了温室小气候自动监控系统,并在技术上不断更新,先是基于 GPRS 和 WEB 技术,通过 RS-485 总线与数字传感器连接,并与 PC 监控计算机构成温室现场监控系统,再通过 GPRS 无线通讯技术建立现场监控系统与互联网连接,将实时采集信息发送到 WEB 数据服务器^[4]。针对 RS-485 总线传输距离相对较短、无法实现远程监测的问题,又研制了基于 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 嵌入式^[5]和基于 ARM-Linux 与 GPRS 的无线远程通信技术^[6],解决了数据远程传输的技术问题。针对此方法需要安装大量传感器和终端设备,现场布线和设备安装搬移困难的不足,又研制了基于 ZigBee 网络的温室环境远程监控系统^[7],但 ZigBee 网络系统使用的是一种低功耗近距离的通信技术,其信号相对较弱,抗干扰能力差。为了解决此问题,又研制了基于 3G 和 VPN 的温室远程监控系统^[8],采用更为先进的第三代移动通信技术,并运用虚拟技术搭建安全可靠的虚拟专用网络,对温室环境因子数据进行自动采集、远程传输、存储管理、网络发布、分析处理。近年来,物联网技术^[9-10]也被广泛应用到日光温室小气候的监控中。

2.2 小气候变化规律研究

日光温室的封闭性或半封闭性决定了温室内独特的小气候环境,掌握了温室内小气候的变化规律,才能有目的地合理开发和利用。

由于日光温室内小气候与温室本身的结构、温室内种植作物的种类、外界气象条件和人为控制等有关,所以人们多是针对不同结构、不同天气状况、不同作物的温室内小气候进行研究。在结构上,有大跨度、厚墙体、砖墙体、半地下式和地平式等不同结构类型;在地域上,东起山东,西到新疆,南起江皖,北到黑龙江,适用不同地域的日光温室都有涉及;天气状况涉及晴天、多云、寡照、雨雪等天气;涉及的作物多以黄瓜、西葫芦、番茄、青椒、茄子等为代表的喜温果菜为主,少量涉及芹菜等比较耐寒的蔬菜;研究内容主要是针对温室内气温、地温、空气湿度、太阳辐射、二氧化碳气体等因子,从日、旬、月、生长季等角度研究其时间变化规律,从水平分布及垂直分布角度研究其空间变化规律。

有研究表明,晴天和多云天气下温室内的气温、地温、空气相对湿度和接受到的太阳辐射存在明显的日变化^[11],温室内最高气温一般能上升到 30℃以上,中部气温升高幅度大于南部和北部,白天南边高于北边,夜间则相反,温度在垂直分布上的变化要比水平分布剧烈得多^[12-13];温室内空气相对湿度白天下降,一般能下降到 50%~60%,夜间则又升高^[11];温室内接受到的太阳辐射南部高于北部,中部略高于东、西部,上层高于下层,上下层的差异比南北差异明显,太阳辐射量分布与作物冠层高度、累积叶面积指数和净光合速率均有一定的相关性^[14-16]。在阴、雪、雾等寡照天气下,温室内的气温、地温、空气相对湿度和接受到的太阳辐射日变化则不明显或无日变化,在冬季如果遇到长时间连续阴、雪、雾等寡照天气,温室内的气温则会降到 10℃以下,甚至更低,温室内空气相对湿度基本处于饱和状态,接受到的太阳辐射值很低,甚至为 0^[11]。温室内不同层次土壤温度明显不同,下层土壤温度变化幅度较上层小,且最高温出现的时间滞后于上层,50 cm 地温在一天中几乎无变化^[17-18]。温室内的土壤温度存在边际效应,土壤边际温度界点在不同时期并不相同,郑州 11 月下旬温室土壤边际温度界点距离温室南底脚 105 cm,在最冷的 1 月距南底脚 270 cm,在 3 月下旬距南底脚仅 45 cm^[19]。日光温室内 CO₂ 浓度日变化曲线通常呈不规则“U”形,有时呈不规则“W”形,表现为昼间下降夜间升高的变化趋

势;幼苗期群体光合较弱,土壤呼吸旺盛,温室内 CO₂ 浓度较高;结果期群体光合旺盛,土壤呼吸衰竭,CO₂ 亏缺严重;CO₂ 亏缺最严重季节为低温寡照的 12 月至翌年 2 月^[20-24]。

2.3 小气候模拟研究

对日光温室小气候进行模拟,可以更好地了解温室小气候形成的机理,也可为温室小气候的调控提供决策依据。

国内对日光温室小气候的模拟起步于 20 世纪 90 年代,模拟方法主要有依据能量和物质平衡的物理模型法、计算流体力学(CFD)模型法,主要涉及对温室内温度、湿度和辐射等因子的模拟。利用能量和物质平衡的物理模型法进行模拟的比较,如利用稳态传热理论建立温室内气温数值模拟模型^[25];在考虑温室内作物对温室内热环境影响的基础上,建立了日光温室内的温度预测数学模型^[26];根据日光温室内空气和北墙、东墙、西墙、后屋面、前屋面覆盖材料、土壤的能量和物质守恒原理,建立了日光温室热环境的动态数学模拟模型^[27-28];在考虑日光温室内的太阳辐射、对流换热、辐射换热、热传导、自然通风和水分相变带来的潜热对日光温室热环境影响的基础上,建立了日光温室热环境模拟模型^[29];在考虑温室建筑参数改变对温室内各表面太阳辐射照度影响的基础上,建立了温室内各表面太阳辐射照度模拟模型^[30];在考虑温室内直接辐射、散射辐射及作物生长对辐射的影响的基础上,对温室光环境进行模拟和分析^[31-34]等。这些模型从不同角度对温室内的微气候进行了模拟,物理意义明确,但涉及的参数较多,而影响日光温室内小气候的因子多且繁杂,如果参数设定不好,就会给模拟带来误差。

计算流体力学(CFD)技术对于模拟温室内的气流场及温度场的变化具有强大的功能及准确性,在模拟过程中考虑了温室各组成部分的温度随时间和空间变化的动态过程。目前应用流体力学模型进行的模拟研究尚比较少,仅见中国农业大学、吉林大学等单位利用 CFD 中非稳态方法求解控制方程,模拟晴天温室内温度的动态变化过程^[35]和空气流动^[36-37],并对日光温室土壤温度分布的边际效应进行了数值模拟^[38]。

2.4 温室内小气候与外界气象条件的关系研究

日光温室内小气候虽然受人为环境控制,但温室内的小气候环境也受到温室外气象条件的很大影响。

影响温室内小气候的主要气象因子有温室外的

日照时数、气温、空气湿度、云量、风力及温室内的基础温度等^[11]。天空云量越少,温室在白天接受的太阳辐射就越多,温室内光照强度随着天空云量的增加而减弱^[39-40]。在晴好天气条件下,温室内的小气候条件能够满足蔬菜生长发育的需求,但当温室外气象条件达到一定程度时,温室内的小气候环境便不能满足温室内植物生长发育的需求并受到一定的影响,如当连续 3 d 无日照时,蔬菜生长速度减缓,开始落花、落果,无日照时间持续越长,蔬菜受影响越重^[41-42];当温室外最低气温降到 5℃并持续 12 h,或 7℃下持续 12~24 h,或 9℃下持续 24 h,或 11℃下持续 24~96 h,蔬菜就会受到低温冷害,且低温持续时间越长冷害程度就越严重^[43-44];当温室外风力达到 15 m/s 以上时,就有可能对温室造成风灾;日降雪量达到 15 mm 以上时就可能造成雪灾^[45]。由于各地外界气象条件不同,有的区域适宜发展日光温室,有的区域则不适宜发展^[46-48],不同区域日光温室遭受灾害的风险也不同,如河北省石家庄中部、邢台中部、邯郸大部以及保定、衡水两市局部在冬季发生低温寡照灾害的风险较大^[49];鲁北、鲁西北北部、鲁中北部以及半岛内陆地区遭受低温冷害风险较大,半岛东部沿海、鲁西南、鲁南及鲁东南沿海区域风险相对较小,山东其他地区属于中度风险区^[43];天津市 12 月至翌年 2 月遭受低温灾害的风险最大^[50-52]。

2.5 温室小气候预报技术研究

及时、准确地对温室内小气候进行预报,有助于农业生产部门及时采取有效措施,有目的地进行温室管理和调控。

日光温室内小气候预报的主要内容有温度(气温、地温)、湿度、接受到的太阳辐射及空气二氧化碳浓度的动态变化等,预报时效有日、月、季等不同时间尺度。使用较多的方法为统计回归、神经网络、季节性时间序列以及利用能量平衡原理建立预报模型等。

应用神经网络方法对温室内小气候进行预报,多是在对日光温室小气候实测数据进行分析的基础上,建立以影响温室内小气候的室外气象要素及管理情况作为神经网络的输入量,以温室内的温度、湿度等为输出量的神经网络模型,对温室内的温度、湿度进行预测^[53-55]。也有研究应用季节性时间序列模型的理论和方法,建立温室内日湿度 AR(P)模型,对日光温室内的空气湿度进行预报^[56]。

应用统计回归方法对温室内小气候进行预报则

是采用相关、聚类、判别等方法,分析温室内温度、湿度等预报因子与温室外的大气环流特征等宏观因子或与逐时、逐日、逐月的温度、湿度、日照、风力、云量等地面气象要素的关系,建立预报模型^[11,57-61]。近年来有研究利用自回归移动平均方法对多元回归模型进行修订来预报温室内的气温、空气湿度和地温^[62]。

也有不少研究应用能量平衡法,考虑温室内作物的蒸腾、土壤蒸发、覆盖层内表面凝结和闭膜后的冷风渗透以及太阳辐射、热交换、热传导、自然通风和水分相变等对温室小气候的影响,建立温室内温度、湿度及太阳辐射等的预测模型^[63-64];根据质量平衡原理,构建适用于北方干旱、寒冷地区的典型日光温室内二氧化碳浓度的动态预测模型^[65]。

上述方法各具优缺点,如基于神经网络、季节性时间序列等构建的预报模型,虽然预报精度较高,但由于温室内种植的植物生长特性差异较大,缺乏应用的广适性;通过能量平衡原理构建的预报模型机理性强,但相关参数繁杂或难以获得,进而影响其推广应用;采用统计回归方法构建的预报模型较前两者具有比较优势,且预报时效较长。在研究过程中,可以根据研究的侧重点选择不同的方法。

2.6 小气候对蔬菜生长发育的影响研究

日光温室内蔬菜生长发育离不开其小气候环境。温室小气候对蔬菜生长发育的影响研究主要涉及对蔬菜根茎叶生长、果实发育、产量、品质的影响,对氮、磷、钾矿物质吸收、光合作用、生理功能等的影响以及对种植制度的影响等。

在适宜的小气候范围内,随温度和光照强度的增加,番茄的株高、茎粗、叶片生长、地上部和根系鲜质量、干物质积累量均相应增加^[66-67],影响春茬番茄果实日增质量的限制因子是温差和光强,秋茬番茄果实日增质量的限制因子是平均气温^[68],温室蔬菜干物质生产和分配还与辐射热积有关^[69],但如果温室内小气候处于高温、亚高温、低温、亚低温、弱光及其组合等条件下时,蔬菜生长发育则会受到影响。亚适温弱光处理的黄瓜单株叶面积和干物质量均明显减小^[70]。夜间低温抑制了番茄幼苗根系对氮、磷、钾、钙、镁元素的吸收^[71]。当进入到温室内的光照强度是自然光的 75%(晴天中午光强 710~874 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)时,其对番茄植株生长和产量无显著影响,当光照强度继续下降至 620 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以下时,产生的弱光胁迫使番茄植株的生长量、干物质积累和产量显著降低^[72]。弱光条件下使黄瓜化

瓜率明显增加,产量平均降低 30%左右,黄瓜功能叶片光合产物输出比率显著降低^[73]。在最低气温 2~3℃、透光率 51.96%的低温寡照处理下,番茄净光合速率、气孔导度、叶绿素含量等指标均有所下降,当低温寡照处理 2 d 后,各项指标可迅速恢复至对照水平;低温寡照处理 3 d,虽会对番茄产生一定影响,但各项指标依然可以恢复;但低温寡照处理 4 d 后,即使将番茄植株置于良好的环境中,各项指标的恢复也不明显^[74]。不同茬口温室内的温光条件影响蔬菜干物质和氮、磷、钾的累积量及其在植株各器官的分配比例,冬春茬较秋冬茬利于蔬菜根系发育和对氮、磷、钾的吸收分配。如秋冬茬番茄干物质和氮、磷、钾的累积吸收量分别为冬春茬番茄的 84%,78%,65%和 78%^[75-76]。延长通风时间与增施 CO₂ 使黄瓜平均光合速率分别提高 1.63 和 3.33 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,可促进光合产物的积累^[77]。对结瓜初期和结瓜盛期的日光温室黄瓜施用 CO₂ 气肥,产量分别比对照增产 28.9%和 27.1%^[78]。

日光温室内的微气候对种植制度也有影响。日光温室使冬、秋、春三季 $\geq 0^\circ\text{C}$ 的积温和 $\geq 10^\circ\text{C}$ 的活动积温显著增加,尤其在冬季增加更明显,充足的热量可以增加温室内作物的复种潜力和复种指数^[79]。

2.7 温室小气候的调控技术研究

因为日光温室蔬菜生产是反季节生产,为了给温室内创造一个良好的小气候环境,需要对温室内的温度、湿度、太阳辐射、二氧化碳浓度等小气候进行调控,调控技术及应用效果在很大程度上决定着温室蔬菜生产的成败和生产效益的高低。

目前,针对日光温室小气候进行调控的方法很多。对温度的调控主要采用保温、增温、变温等方式,如用草帘、棉被、无纺布等多层覆盖,内设保温幕及用地面加热系统、地源热泵系统、地中热交换系统、太阳能蓄热系统增温等。研究表明,草帘的保温能力一般为 5~6℃,棉被为 7~10℃,双层草帘为 14~15℃,保温幕使温室内气温在晴天夜间平均提高 1.5℃^[80];地面加热系统可使温室内温度水平分布均匀,南北方向上差异在 1℃左右^[81];地源热泵系统可增温 13℃左右,平均相对湿度降低 20%^[82];地源热泵系统也可用于夏季温室降温^[83];地中热交换系统可使土壤温度提高 2℃左右,气温平均提高 2.6℃^[84];太阳能蓄热系统可提高温室内夜间气温 4.4℃,提高 20~40 cm 地温 3~5℃^[85]。还有研究表明,采用秸秆生物反应堆技术可提高地温 2~5℃,并使蔬菜上市提早 2~15 d,蔬菜增产 20%~

40%^[86-87];利用水的吸热与放热原理,建造水幕帘,可使日光温室夜间温度提高 5.4℃以上,作物根际温度提高 1.6℃以上,与电加热方式相比,该系统的节能率达 51.1%以上^[88-89];应用基于热泵的日光温室浅层土壤水媒蓄放热方法,可使温室内气温、土壤温度分别较对照平均升高 5.7 和 2.9℃^[90-91];或者建造温室时选择合适的材料作为温室的墙体,也可以增加温室的增温、保温效果^[92-93]。

对温室内光照环境的调控多采取补光、张挂反光膜等措施。补光程度达到某一阈值,才会对甜瓜果实糖分积累和蔗糖酶活性的变化产生较大影响,如在陕西杨凌地区,冬季补光 50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的效果并不明显,补光 100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 即可获得较为明显的效果^[94]。张挂反光膜可补充温室内后墙附近的光照度,可以缩小温室内南北方向上光照度的差异,有效改善温室内整体的光环境,提高蔬菜产量^[95]。另外,采用涂覆型 EVA 无滴消雾棚膜,能消除或减轻温室内的雾气,达到无雾或轻雾的防雾效果,增加棚膜的透光性^[96]。

对温室内湿度的调控主要是滴灌、地膜或稻草覆盖、化学吸水除湿和热交换除湿等技术。地膜覆盖能使空气相对湿度降低 2.8%,稻草覆盖能降低 2.3%,覆膜滴灌则能降低 3%^[97]。

对温室内 CO₂ 浓度的调控主要是通过通风或增施 CO₂ 气肥^[77-78],或使用秸秆生物反应堆^[87]等达到增加温室内 CO₂ 的目的。

前人还注重对小气候调控机理的研究,如沈阳农业大学建立了温室地基稳态传热的数学模型,利用 ANSYS 热分析软件对未设防寒沟和设置防寒沟 2 种情况进行了有限元分析,得出在温室前底脚沿地基深度方向设置防寒沟具有良好的保温效果,可以提高温室内土壤的温度^[98],从理论上论证了防寒沟的效果。还有研究采用 CFD 流体数值分析软件 Fluent,建立了温室空气的传热及流动模型,发现温室内地面下沉 1.0 m 时,日光温室调节小气候的性能最好^[99]。

3 日光温室小气候研究展望

国内目前在温室小气候方面有了一定的研究基础,为设施农业的发展做出了积极的贡献。根据设施农业可持续发展与生产需求及农业气象业务发展需求,针对日光温室小气候研究方面存在的薄弱环节,本研究认为日光温室小气候的研究应在以下方面有所加强。

3.1 立足防灾减灾的日光温室小气候监测预测技术

日光温室蔬菜生产受外界气象条件的影响,制约蔬菜稳定生产的主要因子就是气象灾害,尤其在气候变暖背景下,极端天气事件的增加,使设施农业生产面临着更严重的威胁。同时,日光温室蔬菜生产存在一定的脆弱性,抗御气象灾害的能力较差,所以防灾减灾尤为重要。加强日光温室小气候监测预报技术研究,建立多学科相融合的小气候监测体系,获取稳定、准确的高质量、高频次的小气候监测数据,并结合温室内作物生长发育和未来天气预报,建立长、中、短期小气候预报技术,实时掌控小气候的动态变化,对有目的地调控温室小气候、合理开发利用温室小气候及温室管理有非常重要的意义。

3.2 立足气候资源优势的小气候高效利用技术

日光温室蔬菜生产涉及生物工程、农业工程、环境工程等多个领域,在结构相对稳定的前提下,温室内蔬菜生长发育受温室内小气候和温室外大气候的共同影响。全国各地气候资源不同,根据气候资源的时空分布特点,从区域优势、气候资源优势角度出发,在充分考虑温室的气候适宜性、气候生产潜力、气候灾害风险的基础上,研究小气候高效利用技术,解决在何种、种什么、怎么种的问题,趋利避害,这是保障设施农业可持续发展的基本前提,也是设施农业发展的重要途径之一。

3.3 立足农业气象业务发展的小气候分析评估技术

目前我国针对大田作物的农业气象情报和预报服务业务已普遍展开,也已经纳入业务化、常态化,定时制作农业气象旬报、月报、季报、年报和产量趋势预报,分析评价气象条件对农作物的影响,预测农作物气象产量,在农事关键季节和气象灾害发生的前中后期进行跟踪服务,为政府部门、生产部门进行决策提供依据。而对于设施农业的气象服务仅仅依赖于科研成果的转化,还没有形成成熟实用的量化评估方法,也没有达到规范化和业务化的程度。随着各地设施农业的发展,针对设施农业的气象服务刻不容缓,设施内小气候是否适宜蔬菜生长发育和产量形成,影响程度如何,都需要量化的分析评估技术,并纳入农业气象业务,使农业气象业务向设施农业迈进。

3.4 立足节能降耗、低碳生产的小气候调控技术

一般瓜类、茄果类蔬菜二氧化碳饱和点浓度为 $1\ 500\ \mu\text{L/L}$ 左右,而日光温室内白天在日出后至上

午放风前二氧化碳浓度往往不足,远远不能满足设施蔬菜光合作用对二氧化碳的需要。所以研究利用二氧化碳施肥技术和开发“碳基肥料”不仅可以提高农作物的产量,而且还可以大幅度减少二氧化碳来发展低碳农业。另外,沼气是有机物在厌氧条件下经微生物的发酵作用而生成的一种可燃性混合气体,发展农村沼气,建设生态型温室蔬菜生产,既可为农民提供高品质的清洁能源,同时能够减少农药化肥的污染,保护环境,促进设施农业增产增收和农村经济持续发展。

4 结 语

本研究回顾了我国日光温室的发展历程,较系统地总结了我国日光温室小气候方面的主要研究成果,并阐述了我国日光温室小气候未来的研究重点和方向。

我国在日光温室小气候方面取得了丰硕的研究成果,这些成果已极大地促进了设施农业的发展,设施农业已经成为农民增收、农业增产的支柱产业,对蔬菜的周年供应起到了重要的支撑作用,未来还有更多的配套研究需要探索。

[参考文献]

- [1] 周长吉,杨振声.准确统一“日光温室”定义的商榷[J].农业工程学报,2002,18(6):200-202.
Zhou C J, Yang Z S. Discussion on a precise definition of “Sun-light Greenhouse” [J]. Chinese Academy of Agricultural Engineering, 2002, 18(6): 200-202. (in Chinese)
- [2] 李天来.我国日光温室产业发展现状与前景[J].沈阳农业大学学报,2005,36(2):131-138.
Li T L. Current situation and prospects of green house industry development in China [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2005, 36(2): 131-138. (in Chinese)
- [3] 应向民.分布式网络控制系统在温室工程中的应用研究[D].北京:中国农业大学,2001.
Ying X M. Study on the application of distributed network control system in greenhouse [D]. Beijing: China Agricultural University, 2001. (in Chinese)
- [4] 孙忠富,曹洪太,李洪亮,等.基于 GPRS 和 WEB 的温室环境信息采集系统的实现[J].农业工程学报,2006,22(6):131-134.
Sun Z F, Cao H T, Li H L, et al. GPRS and WEB based data acquisition system for greenhouse environment [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(6): 131-134. (in Chinese)
- [5] 李秀红,孙忠富,肖春华,等.基于 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 嵌入式技术的农业环境远程监控系统实现[J].农业工程学报,2007,23(7):156-161.
Li X H, Sun Z F, Xiao C H, et al. Development of remote moni-

- toring system based on $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ embedded technology for agricultural environment [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23 (7): 156-161. (in Chinese)
- [6] 段志超,杜克明,孙忠富,等. 基于 ARM-Linux 和 GPRS 的农业环境无线远程监控系统 [J]. 农业网络信息, 2008(6): 12-15. Duan Z C, Du K M, Sun Z F, et al. Wireless telemonitoring system for agriculture environment based on ARM-Linux and GPRS [J]. Agricultural Network information, 2008(6): 12-15. (in Chinese)
- [7] 韩华峰,杜克明,孙忠富,等. 基于 ZigBee 网络的温室环境远程监控系统设计与应用 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 158-163. Han H F, Du K M, Sun Z F, et al. Design and application of ZigBee based telemonitoring system for greenhouse environment data acquisition [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25 (7): 158-163. (in Chinese)
- [8] 梁居宝,杜克明,孙忠富. 基于 3G 和 VPN 的温室远程监控系统的设计与实现 [J]. 中国农学通报, 2011, 27(29): 139-144. Liang J B, Du K M, Sun Z F. Design and application of greenhouse remote automatic tele-monitoring system based on 3G and VPN [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27 (29): 139-144. (in Chinese)
- [9] 阎晓军,王维瑞,梁建平. 北京市设施农业物联网应用模式构建 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 149-154. Yan X J, Wang W R, Liang J P. Application mode construction of internet of things(IOT) for facility agriculture in Beijing [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(4): 149-154. (in Chinese)
- [10] 黎贞发,王 铁,宫志宏,等. 基于物联网的日光温室低温灾害监测预警技术及应用 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(4): 229-236. Li Z F, Wang T, Gong Z H, et al. Forewarning technology and application for monitoring low temperature disaster in solar greenhouses based on internet of things [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(4): 229-236. (in Chinese)
- [11] 魏瑞江,王春乙,范增禄. 石家庄地区日光温室冬季小气候特征及其与大气气候的关系 [J]. 气象, 2010, 36(1): 97-103. Wei R J, Wang C Y, Fan Z L. Microclimate characteristics under plastic sunlight greenhouse and relationship with macroclimate in Shijiazhuang Region in winter [J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(1): 97-103. (in Chinese)
- [12] 吕德国,杜国栋,秦嗣军,等. 冬季寡照条件对寒地日光温室气象因子的影响 [J]. 云南师范大学学报, 2004, 24(1): 58-61. Lü D G, Du G D, Qin S J, et al. Influences of not enough sun shining in winter on the meteorological factors of solar greenhouse in cold area [J]. Journal of Yunnan Normal University, 2004, 24(1): 58-61. (in Chinese)
- [13] 杨献光,赵宝存,齐志广. 日光型温室内温度梯度变化的观察与分析 [J]. 河北师范大学学报:自然科学版, 2005, 29(1): 79-84. Yang X G, Zhao B C, Qi Z G. The vertical and horizontal distribution of temperature in solar greenhouse [J]. Journal of Hebei Normal University: Natural Science Edition, 2005, 29 (1): 79-84. (in Chinese)
- [14] 彭致功,段爱旺,郜庆炉. 节能日光温室光照强度的分布及其变化 [J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(2): 37-40. Peng Z G, Duan A W, Gao Q L. Distribution and variation radiant intensity in solar greenhouse [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2003, 21(2): 37-40. (in Chinese)
- [15] 白 青,张亚红,余培龙,等. 日光温室黄瓜冠层中太阳辐射分布规律测定分析 [J]. 西北农业学报, 2012, 21(2): 127-131. Bai Q, Zhang Y H, Yu P L, et al. Analysis of solar radiation distribution at the cucumber canopy in sunlight greenhouse [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2012, 21 (2): 127-131. (in Chinese)
- [16] 曲 佳,须 晖,王 蕊,等. 日光温室番茄群体太阳总辐射量的分布规律及其与光合作用的关系 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2011, 39(6): 178-184. Qu J, Xu H, Wang R, et al. Solar radiation distribution and relationship between solar radiation and photosynthesis of tomato canopy in solar greenhouse [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed., 2011, 39(6): 178-184. (in Chinese)
- [17] 赵 鸿,张 强,杨启国,等. 黄土高原半干旱雨养区日光温室小气候分析 [J]. 应用气象学报, 2007, 18(5): 627-634. Zhao H, Zhang Q, Yang Q G, et al. Microclimate inside sunlight greenhouse in semi-arid rain feed region in Loess Plateau [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2007, 18(5): 627-634. (in Chinese)
- [18] 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 R J, Wang X P, Chang G R, 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)
- [19] 孙治强,孙 丽,王 谦,等. 日光温室土壤温度环境边际效应 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 150-155. Sun Z Q, Sun L, Wang Q, et al. Marginal effect of the soil temperature environment in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(5): 150-155. (in Chinese)
- [20] 王西平,魏瑞江,相 云,等. 利用工业尾气进行大棚蔬菜 CO_2 施肥技术体系研究 [J]. 生态农业研究, 2000, 8(1): 53-55. Wang X P, Wei R J, Xiang Y, et al. Technique system of applying CO_2 from industrial exhaust gas to greenhouse vegetable [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2000, 8(1): 53-55. (in Chinese)
- [21] 魏 珉. 日光温室蔬菜 CO_2 施肥效应与机理及 CO_2 环境调控技术 [D]. 南京:南京农业大学, 2000. Wei M. Effects and mechanism of CO_2 enrichment on vegetables as well as regulation techniques of CO_2 environment in solar greenhouse [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2000. (in Chinese)
- [22] 魏 珉,邢禹贤,王秀峰,等. 日光温室 CO_2 浓度变化规律研

- 究 [J]. 应用生态学报, 2003, 14(3): 354-358.
- Wei M, Xing Y X, Wang X F, et al. Variation of CO₂ concentration in solar greenhouse in Northern China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(3): 354-358. (in Chinese)
- [23] 何启伟, 艾希珍, 孙小镭, 等. 日光温室黄瓜栽培 CO₂ 浓度的消长规律初探 [J]. 中国蔬菜, 2002(1): 7-10.
- He Q W, Ai X Z, Sun X L, et al. Preliminary study on dynamic changing of CO₂ concentration in solar greenhouse during the cultivation of cucumber [J]. China Vegetables, 2002(1): 7-10. (in Chinese)
- [24] 杨延杰, 郭泳, 孙晓荣, 等. 番茄长季节栽培日光温室内 CO₂ 浓度变化的分析 [J]. 沈阳农业大学学报, 2000, 31(1): 82-85.
- Yang Y J, Guo Y, Sun X R, et al. Analysis of CO₂ concentration change of long-season tomato cultivation in solar greenhouse [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2000, 31(1): 82-85. (in Chinese)
- [25] 于威, 王铁良, 任冰洁, 等. 辽沈-I 型日光温室内热平衡的建立及数值模拟 [J]. 节能, 2005(8): 22-24.
- Yu W, Wang T L, Ren B J, et al. Research on numerical simulation and heat balance of solar greenhouse-type Liaoshen-I [J]. Energy Conservation, 2005(8): 22-24. (in Chinese)
- [26] 吴春艳, 赵新平, 郭文利. 日光温室作物热环境模拟及分析 [J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 190-195.
- Wu C Y, Zhao X P, Guo W L. Simulation and analysis of the temperature inside the sunlight greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(4): 190-195. (in Chinese)
- [27] 李树海, 马承伟, 张俊芳, 等. 多层覆盖连栋温室热环境模型构建 [J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 217-221.
- Li S H, Ma C W, Zhang J F, et al. Thermal model of multi-span greenhouses with multi-layer covers [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(3): 217-221. (in Chinese)
- [28] 李小芳, 陈青云. 日光温室的热环境数学模拟及其结构优化 [D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- Li X F, Chen Q Y. Simulation of thermal environment and structural optimization for sunlight greenhouse [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- [29] 孟力力, 杨其长, Gerard P A B, 等. 日光温室热环境模拟模型的构建 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 164-170.
- Meng L L, Yang Q C, Gerard P A B, et al. Visual simulation model for thermal environment in Chinese solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(1): 164-170. (in Chinese)
- [30] 佟国红, 李保明. 日光温室内各表面太阳辐射照度的模拟计算 [J]. 中国农业大学学报, 2006, 11(1): 61-65.
- Tong G H, Li B M. Simulation of solar radiation on surfaces of a solar greenhouse [J]. Journal of China Agricultural University, 2006, 11(1): 61-65. (in Chinese)
- [31] 刘洪, 郭文利, 孙忠富, 等. 温室作物生长对地面辐射的影响 [J]. 中国农业气象, 2010, 31(S1): 48-52.
- Liu H, Guo W L, Sun Z F, et al. Effects of crop growth on radiation on ground in greenhouse [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(S1): 48-52. (in Chinese)
- [32] 张亚红, 陈端生, 黄晚华. 日光温室黄瓜群体结构参数及群体内辐射分布分析 [J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 172-176.
- Zhang Y H, Chen D S, Huang W H. Analysis of architectural parameters and solar radiation distribution in cucumber canopy in sunlight greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(1): 172-176. (in Chinese)
- [33] 刘洪, 郭文利, 李慧君. 北京地区日光温室光环境模拟及分析 [J]. 应用气象学报, 2008, 19(3): 350-354.
- Liu H, Guo W L, Li H J. Simulation and analysis on light environment of greenhouse in Beijing area [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, 19(3): 350-354. (in Chinese)
- [34] 马承伟, 赵淑梅, 程杰宇, 等. 日光温室光辐射环境模型构建研究 [J]. 沈阳农业大学学报, 2013, 44(5): 513-517.
- Ma C W, Zhao S M, Cheng J Y, et al. On establishing light environment model in Chinese solar greenhouse [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2013, 44(5): 513-517. (in Chinese)
- [35] 佟国红, 李保明, David M C, 等. 用 CFD 方法模拟日光温室温度环境初探 [J]. 农业工程学报, 2012, 23(7): 178-185.
- Tong G H, Li B M, David M C, et al. Preliminary study on temperature pattern in China solar greenhouse using computational fluid dynamics [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 23(7): 178-185. (in Chinese)
- [36] 张起勋, 于海业, 张忠元. 利用 CFD 模型研究日光温室内的空气流动 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 166-171.
- Zhang Q X, Yu H Y, Zhang Z Y. Airflow simulation in solar greenhouse using CFD model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(16): 166-171. (in Chinese)
- [37] 宫彬彬, 马承伟, 李政红. 运用 CFD 模拟计算温室通风流量系数 [J]. 农机化研究, 2010(10): 11-15.
- Gong B B, Ma C W, Li Z H. Confirmation the flow coefficient of greenhouse ventilation by Computational Fluid Dynamics technique [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010(10): 11-15. (in Chinese)
- [38] 佟国红, 王铁良, 白义奎, 等. 日光温室土壤温度分布边际效应的数值模拟 [J]. 北方园艺, 2010(15): 65-68.
- Tong G H, Wang T L, Bai Y K, et al. Numerical modeling of marginal effect on soil temperature distribution in a Chinese solar greenhouse [J]. Northern Horticulture, 2010(15): 65-68. (in Chinese)
- [39] 崔建云, 董晨娥, 左迎之, 等. 外部环境气象条件对日光温室气象条件的影响 [J]. 气象, 2006, 32(3): 101-106.
- Cui J Y, Dong C E, Zuo Y Z, et al. The influence of outside meteorological conditions on conditions inside greenhouse [J]. Meteorological Monthly, 2006, 32(3): 101-106. (in Chinese)

- nese)
- [40] 王 倩,张海涛,刘 旭,等.下沉式日光温室室内温光环境分析[J].中国农业气象,2013,34(1):37-42.
Wang Q,Zhang H T,Liu X,et al. Analysis on temperature and light in sinking solar greenhouse [J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2013,34(1):37-42. (in Chinese)
- [41] 魏瑞江.日光温室低温寡照灾害指标 [J].气象科技,2003,31(1):50-53.
Wei R J. The disaster grades of low temperatuer and spare sunlight in greenhouse [J]. Meteorological Science and Technology,2003,31(1):50-53. (in Chinese)
- [42] 魏瑞江.日光温室黄瓜低温寡照灾害预警技术研究[D].兰州:兰州大学,2010.
Wei R J. Study on forewarning technology of the disaster from low temperature and spare sunlight during the cucumber growth in sunlight greenhouse [D]. Lanzhou: Lanzhou University,2010. (in Chinese)
- [43] 薛晓萍,李 楠,杨再强.日光温室黄瓜低温冷害风险评估技术研究 [J].灾害学,2013,28(3):61-65.
Xue X P,Li N,Yang Z Q. Risk assessment technology of chilling injury on cucumbers in solar greenhouse [J]. Journal of Catastrophology,2013,28(3):61-65. (in Chinese)
- [44] 彭晓丹,杨再强,柳 笛,等.温室黄瓜低温气象灾害指标 [J].气象科技,2013,41(2):394-399.
Peng X D,Yang Z Q,Liu D,et al. Study of low-temperature disaster index of greenhouse cucumbers [J]. Meteorological Science and Technology,2013,41(2):394-399. (in Chinese)
- [45] 杨再强,张婷华,黄海静,等.北方地区日光温室气象灾害风险评价 [J].中国农业气象,2013,34(3):342-349.
Yang Z Q,Zhang T H,Huang H J,et al. Meteorological disaster risk evaluation of solar greenhouse in North China [J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2013,34(3):342-349. (in Chinese)
- [46] 张明洁,赵艳霞.北方地区日光温室气候适宜性区划方法 [J].应用气象学报,2013,24(3):278-286.
Zhang M J,Zhao Y X. The climate suitability zoning method of the solar greenhouse in the Northern of China [J]. Journal of Applied Meteorological Science,2013,24(3):278-286. (in Chinese)
- [47] 魏瑞江,赵春雷.基于GIS的河北果菜日光温室最佳发展区域确定 [J].中国农业资源与区划,2005,26(1):35-38.
Wei R J,Zhao C L. Confirmation of most suitable area for developing fruit and vegetable solar greenhouse in Hebei Province by using GIS technology [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2005,26(1):35-38. (in Chinese)
- [48] 张亚红,陈青云.中国温室气候区划及评述 [J].农业工程学报,2006,22(11):197-202.
Zhang Y H,Chen Q Y. Greenhouse climatic zoning and its commentary in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2006,22(11):197-202. (in Chinese)
- [49] 魏瑞江,李春强,康西言.河北省日光温室低温寡照灾害风险分析 [J].自然灾害学报,2008(3):56-62.
Wei R J,Li C Q,Kang X Y. Hazard risk analysis of low temperature and few sunshine for sunshine greenhouse in Hebei Province [J]. Journal of Natural Disasters,2008(3):56-62. (in Chinese)
- [50] 李 春,黎贞发,谢东杰,等.天津市日光温室生产的气候资源比较分析 [J].北方园艺,2010(4):63-65.
Li C,Li Z F,Xie D J,et al. Comparative analysis of climate resources for greenhouse production in Tianjin [J]. Northern Horticulture,2010(4):63-65. (in Chinese)
- [51] 李 春,柳 芳,黎贞发,等.环渤海地区节能型日光温室生产的气候资源分析 [J].中国农业资源与区划,2009,30(2):50-53.
Li C,Liu F,Li Z F,et al. Climate resources analysis under energy saving type of day light greenhouse production in surrounding Bo Sea Area [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2009,30(2):50-53. (in Chinese)
- [52] 黎贞发,李 春,李 宁,等.天津市日光温室低温灾害特点及防御对策 [J].中国蔬菜,2013(17):6-9.
Li Z F,Li C,Li N,et al. Characteristics and defensive countermeasures of low temperature disaster in sunlight greenhouse in Tianjin [J]. China Vegetables,2013(17):6-9. (in Chinese)
- [53] 朱春侠,童淑敏,胡景华,等. BP 神经网络在日光温室湿度预测中的应用 [J].农机化研究,2012(7):207-210.
Zhu C X,Tong S M,Hu J H,et al. Application of nerve network on forecasting temperature in sunlight greenhouse [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2012(7):207-210. (in Chinese)
- [54] 何 芬,马承伟.遗传算法优化人工神经网络模型在日光温室湿度预报中的应用 [J].中国农学通报,2008,24(1):492-495.
He F,Ma C W. Application of BP neural network based on genetic algorithm in predicting the air humidity of sunlight greenhouse [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2008,24(1):492-495. (in Chinese)
- [55] 何 芬,马承伟.温室湿度环境的主成分分析人工神经网络建模研究 [J].上海交通大学学报:农业科学版,2008,26(5):428-431.
He F,Ma C W. Greenhouse air humidity modeling based on principal component analysis and artificial neural network [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science,2008,26(5):428-431. (in Chinese)
- [56] 王 鑫,魏瑞江,康西言.日光温室湿度日预测的季节时序模型应用研究 [J].中国农学通报,2010,26(22):407-412.
Wang X,Wei R J,Kang X Y. Application of seasonal time series model in forecasting greenhouse daily humidity [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2010,26(22):407-412. (in Chinese)
- [57] 薛晓萍,李鸿怡,李 楠,等.日光温室小气候预报技术研究 [J].中国农学通报,2012,28(29):195-202.
Xue X P,Li H Y,Li N,et al. Study on microclimate forecast

- technique of sunlight greenhouse [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(29): 195-202. (in Chinese)
- [58] 李 宁, 申双和, 黎贞发, 等. 基于主成分回归的日光温室内部低温预测模型 [J]. 中国农业气象, 2013, 34(3): 306-311.
Li N, Shen S H, Li Z F, et al. Forecast model of minimum temperature inside greenhouse based on principal component regression [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2013, 34(3): 306-311. (in Chinese)
- [59] 柳 芳, 王 铁, 刘淑梅. 天津市二代节能型日光温室内部温湿度预测模型 [J]. 中国农业气象, 2009, 30(S1): 86-89.
Liu F, Wang T, Liu S M. Research on temperature and humidity forecasting model for second energy saving solar greenhouse in Tianjin [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 30(S1): 86-89. (in Chinese)
- [60] 李美荣, 刘映宁, 赵 军, 等. 陕西省关中地区大棚蔬菜低温冻害预报服务方法 [J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(5): 204-207.
Li M R, Liu Y N, Zhao J, et al. The forecast of freeze injury to greenhouse vegetables by low temperature in Guanzhong area of Shaanxi Province [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25(5): 204-207. (in Chinese)
- [61] 魏瑞江, 康西言, 姚树然, 等. 低温寡照天气形势及温室蔬菜致灾环境 [J]. 气象科技, 2009, 37(1): 64-66.
Wei R J, Kang X Y, Yao S R, et al. Circulation patterns of low-temperature and overcast weather and disaster-inducing environment for sunlight greenhouses [J]. Meteorological Science and Technology, 2009, 37(1): 64-66. (in Chinese)
- [62] 曹 雯. 秋冬季南方单栋塑料温室小气候分析与温湿环境模拟研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
Cao W. Analysis and simulation of microclimate of single-span plastic greenhouse for south China in autumn and winter [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Engineering, 2012. (in Chinese)
- [63] 葛建坤, 罗金耀. 基于自然通风的日光温室内部温湿度仿真模型 [J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(1): 61-64.
Ge J K, Luo J Y. Simulation model of temperature and humidity in Chinese solar greenhouse with natural ventilation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(1): 61-64. (in Chinese)
- [64] 何 雨, 须 晖, 李天来, 等. 日光温室后墙内侧温度变化规律及温度预测模型 [J]. 北方园艺, 2012(7): 34-39.
He Y, Xu H, Li T L, et al. The change of temperature of the back wall in solar greenhouse and forecasting model [J]. Northern Horticulture, 2012(7): 34-39. (in Chinese)
- [65] 毕玉革, 麻硕士, 崔红梅, 等. 北方干寒地区日光温室 CO₂ 预测模型建立与冬季试验 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 183-189.
Bi Y G, Ma S S, Cui H M, et al. Forecasting model of CO₂ concentration of solar greenhouse in the northern drought cold area and experimental verification in winter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 183-189. (in Chinese)
- [66] 赵玉萍. 不同温度光照对温室番茄生长、光合作用及产量品质的影响 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
Zhao Y P. Effetal of temperature and light to tomato photosynthesis and quality in greenhouse [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese)
- [67] 赵玉萍, 邹志荣, 杨振超, 等. 不同温度和光照对温室番茄光合作用及果实品质的影响 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(5): 125-130.
Zhao Y P, Zou Z R, Yang Z C, et al. Effetal of temperature and light to tomato photosynthesis and quality in greenhouse [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed, 2010, 38(5): 125-130. (in Chinese)
- [68] 程智慧, 陈学进, 赖琳玲, 等. 设施番茄果实生长与环境因子的关系 [J]. 生态学报, 2011, 31(3): 742-748.
Cheng Z H, Chen J X, Lai L L, et al. Relationship between tomato fruit growth and environmental factors under protetaled facility cultivation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(3): 742-748. (in Chinese)
- [69] 刁 明, 戴剑锋, 罗卫红, 等. 温室甜椒生长与产量预测模型 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 241-246.
Diao M, Dai J F, Luo W H, et al. Model for simulation of growth and yield of greenhouse sweet pepper [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(10): 241-246. (in Chinese)
- [70] 毕焕改, 王美玲, 姜振升, 等. 亚适温弱光对黄瓜幼苗光合酶活性和基因表达的影响 [J]. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2894-2900.
Bi H G, Wang M L, Jiang Z S, et al. Impacts of suboptimal temperature and low light intensity on the activities and gene expression of photosynthetic enzymes in cucumber seedling leaves [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(11): 2894-2900. (in Chinese)
- [71] 倪 洋, 张 雪, 刘玉凤, 等. 夜间低温对番茄幼苗吸收矿质元素的影响 [J]. 华北农学报, 2013, 28(4): 93-97.
Ni Y, Zhang X, Liu Y F, et al. Effetals of low night temperature on mineral elements absorption of tomato seedlings [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2013, 28(4): 93-97. (in Chinese)
- [72] 杨延杰, 李天来, 林 多, 等. 光照强度对番茄生长及产量的影响 [J]. 青岛农业大学学报: 自然科学版, 2007, 24(3): 199-202.
Yang Y J, Li T L, Lin D, et al. Effetals of different light intensity on growth and yield of tomato [J]. Journal of Qingdao Agricultural University: Natural Science, 2007, 24(3): 199-202. (in Chinese)
- [73] 王兴银, 张福漫. 弱光对日光温室黄瓜光合产物分配的影响 [J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(5): 36-41.
Wang X Y, Zhang F M. Influence of poor light on the distribution pattern of assimilate of cucumber in solar greenhouse [J]. Journal of China Agricultural University, 2000, 5(5): 36-41. (in Chinese)
- [74] 于 红, 黎贞发, 罗新兰, 等. 低温寡照对日光温室番茄幼苗生

- 长的影响 [J]. 北方园艺, 2011(24): 56-60.
- Yu H, Li Z F, Luo X L, et al. Effetal of low temperature and less sunlight on the growth of tomato seedling in solar greenhouse [J]. Northern Horticulture, 2011(24): 56-60. (in Chinese)
- [75] 刘 军, 高丽红, 黄延楠. 日光温室两种茬口下番茄干物质及氮磷钾分配规律研究 [J]. 中国农业科学, 2004, 37(9): 1347-1351.
- Liu J, Gao L H, Huang Y N. Study on distribution of nitrogen, phosphorus and potassium of tomato in different crops in solar greenhouse [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(9): 1347-1351. (in Chinese)
- [76] 裴孝伯, 张福漫, 王 柳. 不同光温环境对日光温室黄瓜氮磷钾吸收分配的影响 [J]. 中国农业科学, 2002, 35(12): 1510-1513.
- Pei X B, Zhang F M, Wang L. Effetal of light and temperature on uptake and distribution of nitrogen, phosphorus and potassium of solar greenhouse cucumber [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(12): 1510-1513. (in Chinese)
- [77] 崔庆法, 王 静. 延长通风时间与增施 CO₂ 对温室生态因子及黄瓜光合特性的影响研究 [J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(2): 84-85.
- Cui Q F, Wang J. Effetals of prolonging ventilation time and enriching CO₂ in greenhouse on the ecologic factors and photosynthetic rate of cucumber [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2004, 12(2): 84-85. (in Chinese)
- [78] 马鹏里, 杨小利, 李小娟. 日光温室施用 CO₂ 气肥对黄瓜生长发育的影响 [J]. 中国农业气象, 2003, 24(4): 48-50.
- Ma P L, Yang X L, Li X J. A study of influence of CO₂ fertilizer application on growth and development of cucumber in greenhouse [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2003, 24(4): 48-50. (in Chinese)
- [79] 邵庆炉, 段爱旺, 梁云娟. 日光温室内温光条件对作物种植制度的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(1): 106-110.
- Gao Q L, Duan A W, Liang Y J. Effetals of temperature and light condition on crop planting system within solar greenhouse [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2004, 22(1): 106-110. (in Chinese)
- [80] 张亚红, 杜建民, 李建设. 日光温室内设保温幕的小气候效应及节能效果分析 [J]. 农业现代化研究, 2006, 27(4): 296-299.
- Zhang Y H, Du J M, Li J S. Effetal of inside thermal screen on microclimate changing and energy saving in sunlight greenhouse [J]. Research of Agricultural Modernization, 2006, 27(4): 296-299. (in Chinese)
- [81] 曲 梅, 马承伟, 李树海, 等. 地面加热系统温室热环境测定与经济分析 [J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 180-183.
- Qu M, Ma C W, Li S H, et al. Analysis of thermal environment of greenhouse with floor heating system [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(1): 180-183. (in Chinese)
- [82] 张晓慧, 陈青云, 曲 梅, 等. 地源热泵空调系统在日光温室中的加温效果 [J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2008, 26(5): 436-439.
- Zhang X H, Chen Q Y, Qu M, et al. Heating effetals of ground source heat pump on sun-light greenhouse [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science, 2008, 26(5): 436-439. (in Chinese)
- [83] 柴立龙, 马承伟, 张晓蕙, 等. 地源热泵温室降温系统的试验研究与性能分析 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 150-154.
- Chai L L, Ma C W, Zhang X H, et al. Experimental investigation and performance analysis on ground source heat pump system for greenhouse cooling [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(12): 150-154. (in Chinese)
- [84] 白义奎, 迟道才, 王铁良, 等. 日光温室燃池-地中热交换系统加热效果的初步研究 [J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 178-181.
- Bai Y K, Chi D C, Wang T L, et al. Experimental research of heating by fire-pit and underground heating exchange system in a solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(10): 178-181. (in Chinese)
- [85] 刘伯聪, 曲 梅, 苗妍秀, 等. 太阳能蓄热系统在日光温室中的应用效果 [J]. 北方园艺, 2012(10): 48-53.
- Liu B C, Qu M, Miao Y X, et al. The effetal of a solar heat storage system applied in the solar greenhouse [J]. Northern Horticulture, 2012(10): 48-53. (in Chinese)
- [86] 王振庄, 鄯东翔, 宋建新, 等. 河北省蔬菜秸秆生物反应堆技术应用现状及效果分析 [J]. 河北农业科学, 2008, 12(2): 41-42.
- Wang Z Z, Qie D X, Song J X, et al. Vegetable straw stalk biology reactor technology application situation and effetal analysis in Hebei Province [J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2008, 12(2): 41-42. (in Chinese)
- [87] 卞中华, 王 玉, 胡晓辉, 等. 外置式与内置式秸秆生物反应堆对番茄生长及光合性能的影响 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(3): 753-758.
- Bian Z H, Wang Y, Hu X H, et al. Effetals of outer type and built-in type straw bio-reactors on tomato growth and photosynthetic performance [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(3): 753-758. (in Chinese)
- [88] 张 义, 杨其长, 方 慧. 日光温室水幕帘蓄放热系统增温效应试验研究 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 188-193.
- Zhang Y, Yang Q C, Fang H. Research on warming effetal of water curtain system in Chinese solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(4): 188-193. (in Chinese)
- [89] 梁 浩, 方 慧, 杨其长, 等. 日光温室后墙蓄放热帘增温效果的性能测试 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 187-193.
- Liang H, Fang H, Yang Q C, et al. Performance testing on warming effetal of heat storage-release curtain of back wall in Chinese solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(12): 187-193. (in Chinese)
- [90] 方 慧, 杨其长, 梁 浩, 等. 日光温室浅层土壤水媒蓄放热增

温效果 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 258-263.

Fang H, Yang Q C, Liang H, et al. Experiment of temperature rising effetal by heat release and storage with shallow water in solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(5): 258-263. (in chinese)

[91] 方 慧, 杨其长, 张 义. 基于热泵的日光温室浅层土壤水媒蓄放热装置试验 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 210-216.

Fang H, Yang Q C, Zhang Y. Experimental study on shallow soil assisted heat release-storage system with water-water heat pump in solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(20): 210-216. (in Chinese)

[92] 刘淑梅, 薛庆禹, 李 春, 等. 天津地区不同墙体处理对日光温室保温性能影响初探 [J]. 中国农学通报, 2012, 28(35): 170-179.

Liu S M, Xue Q Y, Li C, et al. Effetals of different wall treatments on thermal insulation of solar greenhouse in Tianjin Area [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(35): 170-179. (in Chinese)

[93] 李小芳, 陈青云. 墙体材料及其组合对日光温室墙体保温性能的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(4): 187-189.

Li X F, Chen Q Y. Effetals of different wall materials on the performance of heat preservation of wall of sunlight greenhouse [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(4): 187-189. (in Chinese)

[94] 任 雷, 胡晓辉, 杨振超, 等. 光照强度对厚皮甜瓜糖分积累与蔗糖代谢相关酶的影响 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(6): 120-126.

Ren L, Hu X H, Yang Z C, et al. Effetals of light intensity on sugar accumulation and sucrose metabolizing enzymes in muskmelon [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed, 2010, 38(6): 120-126. (in Chinese)

[95] 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 J, Cui Q F, Lin M Z. Illumination environment of different structural solar greenhouses and their supplement illumination [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(4): 86-89. (in Chinese)

[96] 戴雅东, 王洪喜, 房思强, 等. 减雾型棚膜在日光温室蔬菜生产中应用的研究 [J]. 沈阳农业大学学报, 2000, 31(1): 106-109.

Dai Y D, Wang H X, Fang S Q, et al. Application of anti-fog greenhouse plastic film in vegetable solar-greenhouse production [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2000, 31(1): 106-109. (in Chinese)

[97] 张亚红, 李建设. 日光温室空气湿度环境及除湿技术研究: Ⅲ. 地膜覆盖、稻草覆盖及膜下滴灌的降湿效果和效应 [J]. 宁夏农学院学报, 2000, 21(3): 32-38.

Zhang Y H, Li J S. Studies on the environment of air humidity and the technology of humidity elimination in sunlight greenhouse: Ⅲ. The effetal of humidity elimination by adopting plastic mulch straw covering and drip irrigation under the plastic mulch [J]. Journal of Ningxia Agricultural College, 2000, 21(3): 32-38. (in Chinese)

[98] 白义奎, 李天来, 张文基. 日光温室地基温度场数学模型及试验分析 [J]. 北方园艺, 2010(13): 49-53.

Bai Y K, Li T L, Zhang W J. Experimental analysis and mathematical model on temperature field of the solar greenhouse's foundation [J]. Northern Horticulture, 2010(13): 49-53. (in Chinese)

[99] 蒋国振. 基于 CFD 的下沉式日光温室模拟与除湿研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2012.

Jiang G Z. Simulation and dehumidification of sinking sunlight greenhouse based on CFD [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2012. (in Chinese)