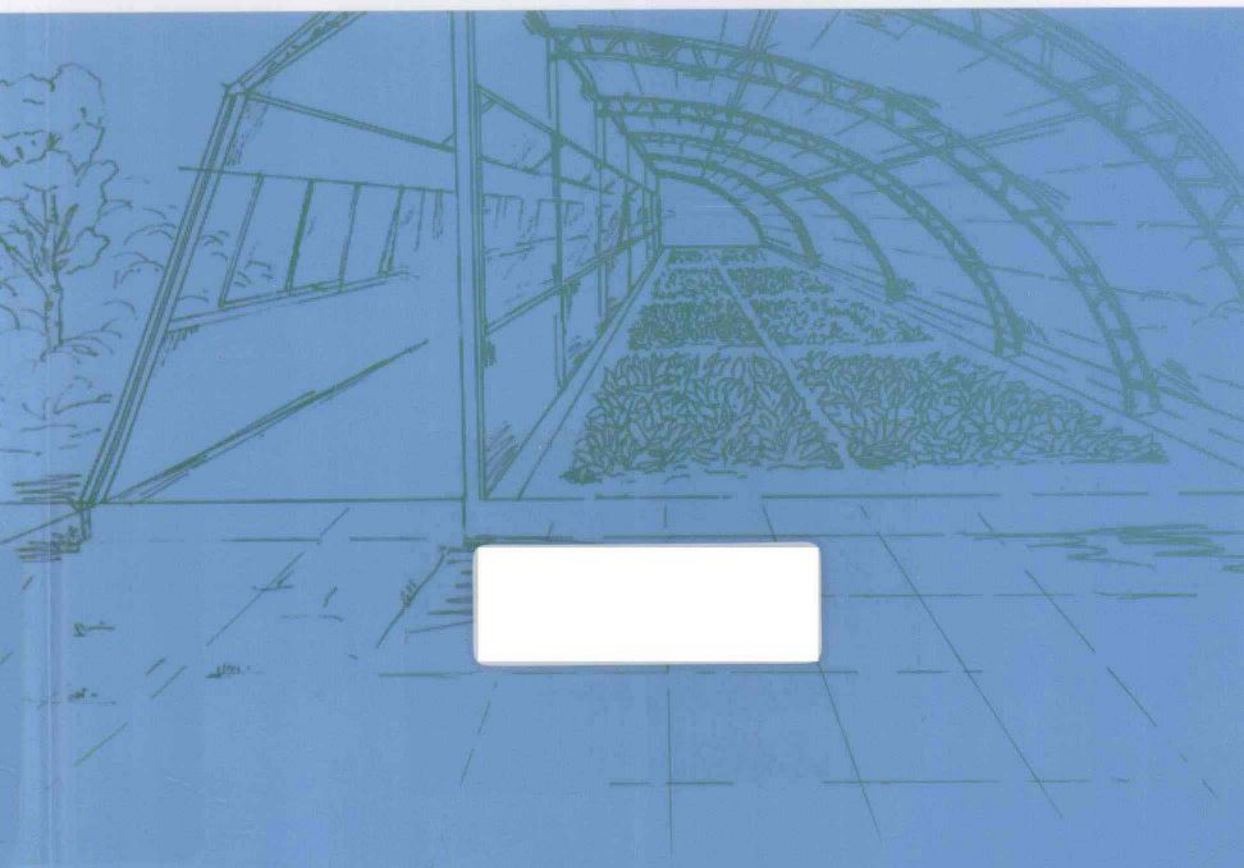


日光温室环境因子 调控技术研究

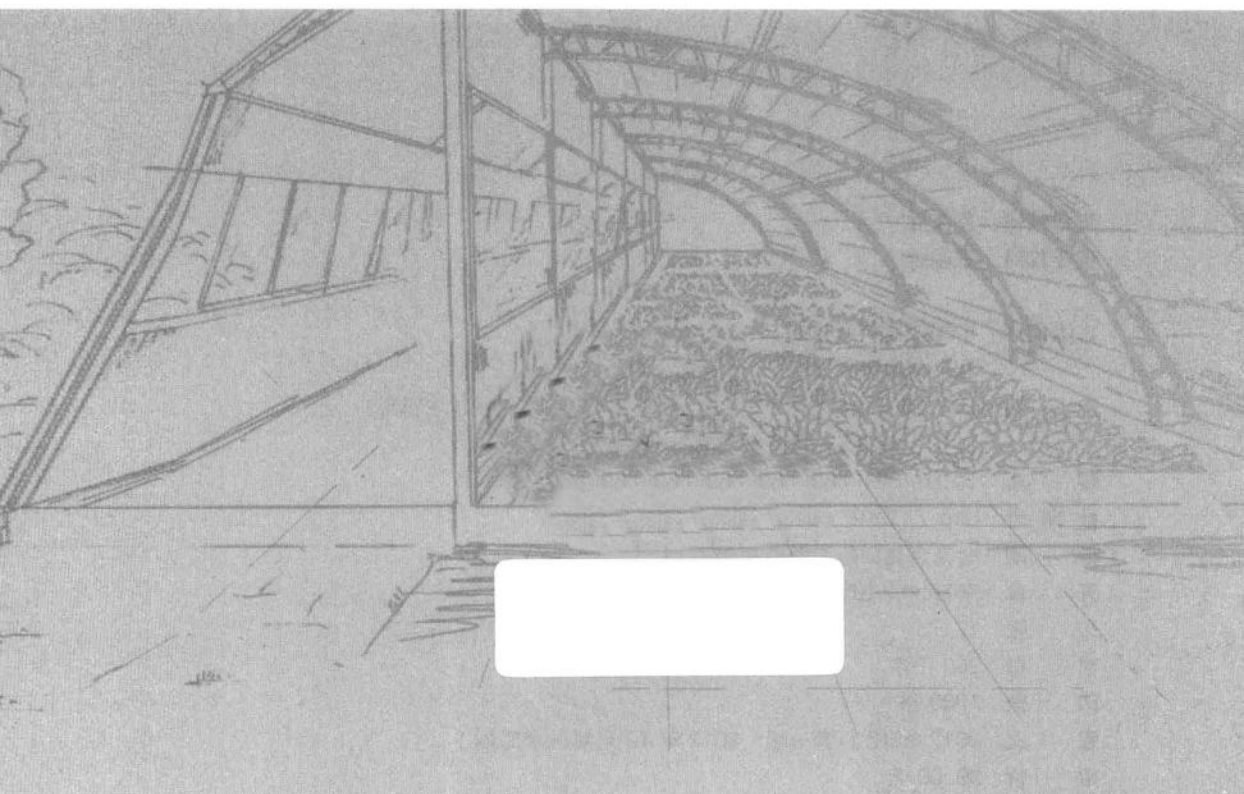
杜震宇 著



中国农业科学技术出版社

日光温室环境因子 调控技术研究

杜震宇 著



中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

日光温室环境因子调控技术研究/杜震宇著. —北京: 中国农业科学技术出版社, 2012. 12

ISBN 978-7-5116-1179-6

I. ①日… II. ①杜… III. ①温室-调节 IV. ①S625.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 305343 号

责任编辑 鱼汲胜

责任校对 贾晓红

出版发行 中国农业科学技术出版社

北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081

电 话 (0) 13671154890 (编辑室) (010) 82106624 (发行部)
(010) 82109703 (读者服务部)

传 真 (010) 82106636

社 网 址 [http:// www. castp. cn](http://www.castp.cn)

印 刷 北京富泰印刷有限责任公司

开 本 787mm × 1092mm 1/16

印 张 17.75

字 数 260 千字

印 数 1000 册

版 次 2012 年 12 月第一版 2012 年 12 月第一次印刷

定 价 39.00 元

前 言

温室是人类智慧与科技文明的结晶,是以资金密集、技术密集、劳动力密集为主要特征的集约型和高效型产业。它改变了传统农业生产的模式,打破了植物生长的地域和时空界限,推动了农业生产的发展和社会文明的进步。尤其是现代温室,将计算机技术应用于温室建设与管理,成为现代农业生产发展的生长点和助推器,是现代农业的代表模式和发展方向。

日光温室由中国独创并具有自主知识产权,适合当前农村经济技术水平,温室结构形式简易、节能、高效。日光温室的特点是保温好、投资低、节约能源。由于其高透光率和高保温性能在北方地区可不加温或只需临时加温就能进行喜温果蔬的越冬生产,因而显著地降低了温室的运行成本,提高了经济效益,在我国北方地区得到大面积的推广,是北方农村脱贫致富和农业出口创汇最有效的农业设施之一,已成为北方农业和农村经济的支柱产业。

因日光温室生产中普遍没有专用的环境因子调控设备,主要依靠遮阳、铺卷帘(或保温棉被)和人工“扒缝”自然通风等来调节其内部的光照度、温湿度和 CO_2 浓度,所以对环境因子调控能力弱,抵御自然灾害的能力差。炎热时,白天室温有时高达 50°C 以上,严重影响植物的生长,失去了温室栽培的价值;寒冷时,为了保温,大多数温室通风换气量极小,室内温度极低,相对湿度可达 $95\% \sim 100\%$,植物易产生病害,甚至常遭受冻害。温湿度环境因子调控的不完善,限制了日光温室高效优势的发挥,制约了日光温室的可持续发展,急需研发投资少、运行费用低、节能环保的环境因子调控装置。

城镇建筑节能工作方兴未艾,农村和农业建筑节能还未起步,降低农村和农业建筑能耗,对减缓我国的能源危机和减少对环境的冲击都具有重大意义。本书介绍了两种日光温室环境因子节能控制系统,即通风热回收

系统和土壤—空气换热系统，并进行了深入的实验研究和数值模拟分析。希望对从事建筑节能研究、设计的工程技术人员，特别是研究日光温室环境控制的工程技术人员和种植及管理人员有所帮助。

本书的特点是注重基础理论在工程实践中的应用，全书共分为 11 章。第一章介绍了日光温室环境因子调控存在的问题、解决办法和供试温室的基本情况；第二章至第六章阐述了在自然通风和全热回收供试温室内，分不同季节对温室内外光照度、空气温湿度、 CO_2 浓度、土壤温度进行的试验研究及其结果；第七章介绍了日光温室热湿物理模型和数学模型的建立与数值计算方法；第八章至第九章分别论述了自然通风和全热回收日光温室内的数值模拟与优化；第十章阐述了土壤—空气换热器的数值模拟和优化；第十一章介绍了日光温室利用土壤—空气换热器降湿的可行性分析与计算结果。

本书作者的研究工作先后得到山西省科学技术厅攻关项目“置换通风全热回收节能温室的研究”（项目编号：2007031066）和“土壤源降温除湿系统在日光温室中的试验研究”（项目编号：20100311062）的资助；作者的硕士生谢秋红、贾蕾、崔良卫、吴书源和周溯等多年来直接参与项目研究的辛勤工作；合作单位山西益丰种业有限公司曹孟梁总经理、程建雄工程师、孔海旺农艺师为项目研究提供了试验场地，并协助和配合完成了试验研究；中国农业科学技术出版社鱼汲胜编审和中国农业科学院作物科学研究所曹广才研究员给予了关心与支持。在此一并致谢！

因作者学识水平和阅历有限，虽竭尽全力，书中仍难免会有疏漏和不妥之处，期待读者批评指正。目前公开报道采用通风热回收和土壤—空气换热器对日光温室环境因子进行调控的试验数据很少，且对它们的影响因素研究的还不够，因此，随着后续课题研究工作的深入，在得到新的资料之后，可能对本书的内容进行完善和充实，也可能会有相应的修正或新的结论产生。

杜震宇

2012 年 10 月于太原

目 录

第一章 绪论	1
第一节 日光温室环境因子及其调控技术的发展	2
一、温室环境因子的重要性	2
二、温室环境因子调控技术的发展	3
第二节 日光温室环境因子调控存在的问题及解决办法	8
一、温室生产中存在的环境问题	8
二、温室环境问题的解决办法	10
第三节 供试日光温室及气候特征	11
一、供试日光温室	11
二、气候特征	13
第二章 日光温室太阳辐射照度的试验研究	15
第一节 春季太阳辐射照度的试验研究	15
一、试验测点布置	15
二、试验条件	15
三、试验方法	16
四、试验结果及分析	16
五、小结	22
第二节 冬季太阳辐射照度的试验研究	22
一、试验测点布置	22
二、试验条件	22
三、试验方法	23



四、试验结果及分析	23
五、小结	29
第三章 自然通风日光温室温湿度的试验研究	30
第一节 自然通风日光温室春季温湿度的试验研究	30
一、试验测点布置	30
二、试验条件	30
三、试验方法	31
四、试验结果及分析	33
第二节 自然通风日光温室夏季温湿度的试验研究	43
一、试验测点布置	44
二、试验条件	45
三、试验方法	45
四、试验结果及分析	45
第三节 自然通风日光温室冬季温湿度的试验研究	53
一、试验测点布置	54
二、试验条件	55
三、试验方法	55
四、试验结果及分析	55
第四章 全热回收日光温室温湿度的试验研究	65
第一节 全热回收日光温室	65
一、通风全热回收机组	65
二、温室通风热回收的必要性	67
三、温室通风热回收的可行性	67
四、全热回收温室	67
第二节 全热回收日光温室春季温湿度的试验研究	69
一、试验测点布置	69
二、试验条件	70
三、试验方法	70
四、试验结果分析	70

第三节 全热回收日光温室冬季温湿度的试验研究	82
一、试验测点布置	82
二、试验条件	83
三、试验方法	83
四、试验结果及分析	83
第四节 全热回收温室与自然通风日光温室冬季温湿度试验的比较	89
一、室内空气温度比较	89
二、PVC 膜内表面温度比较	90
三、北墙内表面温度比较	91
四、土壤表面温度比较	92
五、室内外相对湿度比较	93
六、室内外土壤温度比较	93
第五节 全热回收效率的试验研究	98
一、春季全热回收效率试验结果与分析	98
二、冬季全热回收效率试验结果与分析	103
第五章 日光温室 CO ₂ 浓度的试验研究	106
第一节 日光温室春季 CO ₂ 浓度的试验研究	106
第二节 日光温室夏季 CO ₂ 浓度的试验研究	109
第三节 日光温室冬季 CO ₂ 浓度的试验研究	110
第六章 日光温室土壤温度场的试验研究	113
第一节 日光温室土壤温度场的试验设计	113
一、测点选定与布置	113
二、布线与调试	114
三、数据的采集与整理	115
第二节 夏季土壤温度场的试验研究	116
一、各测点土壤温度之间的关系及影响因素	116
二、土壤温度与气温的关系	117
三、土壤温度场的分布特点	120

第三节 冬季土壤温度场的试验研究	123
一、各测点土壤温度之间的关系及影响因素	123
二、土壤温度与气温的关系	124
三、土壤温度场的分布特点	127
第四节 土壤温度场特点与土壤—空气换热器设置	128
一、土壤温度场的特点	128
二、土壤—空气换热器设置	129
第七章 日光温室热湿环境数值模型与计算方法	132
第一节 日光温室热湿物理模型	132
一、温室热平衡原理	132
二、温室湿平衡原理	135
三、模型简化	136
第二节 CFD 控制方程及紊流模型选择	137
一、守恒控制方程	138
二、紊流模型	140
三、紊流模型选择	146
四、近壁处的模型	147
第三节 太阳辐射照度计算及模型选择	153
一、到达地面的太阳辐射	153
二、进入温室的太阳辐射	155
三、入射辐射在温室内的分配	158
四、辐射模型的选择	158
第四节 墙体非稳态传热模型及计算	161
一、墙体非稳态传热控制方程	162
二、积分变换法	162
三、反应系数法	164
四、室外空气综合温度	169
五、传热量的计算	171
第五节 土壤多孔介质 CFD 模型	171

一、质量守恒方程	172
二、动量守恒方程	172
三、能量守恒方程	173
第六节 数值算法和离散格式	174
一、数值算法	174
二、离散格式	175
三、PISO 算法	176
第八章 自然通风日光温室数值模拟与优化	178
第一节 三维稳态模拟与验证	179
一、计算域的确定	179
二、网格划分	179
三、边界条件的确定	181
四、三维稳态计算结果与分析	184
五、结论	189
第二节 三维非稳态模拟与验证	189
一、春季非稳态模拟	189
二、夏季非稳态模拟	194
第三节 自然通风日光温室的优化设计	197
一、通风口优化	197
二、北墙与后屋面优化	201
第九章 全热回收日光温室数值模拟与优化	205
第一节 三维稳态模拟与验证	205
一、计算域的确定	205
二、网格划分	205
三、边界条件的确定	207
四、三维稳态计算结果与分析	207
第二节 三维非稳态模拟与验证	211
一、边界条件的确定	212
二、三维非稳态计算结果与分析	213

第三节 全热回收日光温室的优化设计	215
一、送风速度优化	216
二、风口开口方式优化	217
第十章 土壤—空气换热器的数值模拟与优化	220
第一节 网格划分与求解设置	220
一、网格划分	220
二、求解设置	222
第二节 夏季最优埋管方式求解	225
一、埋管壁厚对出口气温的影响	225
二、埋管直径对出口气温的影响	226
三、埋管长度对出口气温的影响	227
四、进口风速对出口气温的影响	229
五、埋管间距对出口气温的影响	229
六、夏季最优埋管方式	231
第三节 冬季最优埋管方式求解	233
一、埋管壁厚对出口气温的影响	233
二、埋管直径对出口气温的影响	233
三、埋管长度对出口气温的影响	234
四、进口风速对出口气温的影响	235
五、埋管间距对出口气温的影响	236
六、冬季最优埋管方式	237
第四节 全年最优埋管方式和除湿效果讨论	238
一、全年最优埋管方式	238
二、除湿效果讨论	239
第十一章 日光温室利用土壤—空气换热器降温的可行性分析	242
第一节 土壤—空气换热器模型计算域的选择及网格划分	242
一、计算域的选择	242
二、网格划分	243
三、模型及离散格式选择	244

第二节 日光温室模型计算域的选择及网格划分	244
一、计算域的选择	244
二、网格划分	244
三、基本参数设置	245
第三节 土壤—空气换热器对温室降湿的可行性分析	246
一、边界条件设置	246
二、晴天夜间降湿的可行性分析	248
三、阴雪天夜间降湿的可行性分析	250
第四节 土壤—空气换热器降湿运行时温室热湿环境分析	252
一、边界条件设置	252
二、计算结果与分析	254
主要参考文献	256
附彩图	257



第一章 绪 论

中国为大陆性季风气候，冬季受北方高纬度地区干冷气流，夏季受南方低纬度地区湿热气流交替影响，冬夏温差较大，呈现出冬冷夏热、冬干夏湿的特点。由于大陆性气候的影响，我国大部分地区，特别是长江流域以北，昼夜温差较大。随着全球气候的不断恶化，一些突发性自然灾害的发生更是导致了一系列极端气候，如 2008 年的南方大雪、2010 年的西南大旱，对没有保护措施农业生产造成了极大的损失。为了解决这一矛盾，人们不断加快高投入高产出，资金、技术、劳动力密集型的设施农业发展步伐，使传统农业逐步摆脱自然的束缚，走向现代工厂化、环境安全化、农产品无毒化，同时也打破了传统农业的季节性，实现农产品的反季节供应，进一步满足多元化、多层次的消费需求。

随着农业科学技术的发展、种植结构的调整和人口的增加，设施农业在全世界范围内得到了前所未有的发展，尤其是近年来我国各地新农村和高新农业示范园区的建设，更使温室产业的水平和规模有了很大的提高和扩大，市场对温室相关技术的需求量大增，以现代化连栋温室和节能日光温室为代表的温室产业出现蓬勃发展的势头，日光温室工程技术也进入全面发展的新时期。

温室由于可控程度高，可以进行反季节生产，植物营养能够得到完全保证，病虫害相对较少，化肥用量少，耗水量可以人为控制，可有效地降低生产成本，可以明显提高产品的产量和品质，所以具有极大的发展潜力。目前，温室不仅用于蔬菜的反季节生产，以实现周年均衡供应，而且通过科技创新和成果推广使温室技术向花卉、水果和食用菌等更多领域发展，成为高效、高产农业新的增长点。设施农业的发展成为我国现代农业

生产力水平的标志之一，可有力地推动农村经济的发展，是农村创收和发展“一村一品”的首选项目，越来越多地被应用于种植业、养殖业等现代化农林牧业的规模化生产中。

中华人民共和国农业工程建设标准——《日光温室建设标准》中，将日光温室定义为：“东西墙及北墙均为实体墙或复合墙体、后屋面为保温屋面、南侧前屋面为采光面的温室”。本项目的研究对象为日光温室（以下无特殊情况均简称为温室）。

第一节 日光温室环境因子及其调控技术的发展

阳光、水分和空气是植物生长的三要素，在温室生产中，具体表现为太阳辐射照度、空气温度、空气湿度及空气中 CO_2 浓度等环境因子。

一、温室环境因子的重要性

（一）太阳辐射照度

太阳辐射照度是温室内植物生长的基本能量来源，一方面，太阳辐射作为热源，通过“温室效应”直接决定温室的热环境；另一方面，太阳辐射作为光源，制约着温室植物的光合作用，对植物的产量和质量产生重大影响。所以，太阳辐射照度是植物生长的第一要素，温室中光环境制约着温室潜能，只有充足的光照度才能保证作物生长，可见温室中太阳辐射照度及其均匀性是影响温室生产力的重要因素。

（二）空气温度

温室作为一种农业建筑，其热湿环境对植物的生长发育、产量和品质起着决定性的作用。温度是影响植物生长发育的主要因子之一。温室内植物的光合作用、呼吸作用、水分和养分的吸收以及各种新陈代谢活动对温室内空气温度都有不同的要求，作物必须在一定的空气温度条件下才能进行体内生理活动和各种体内生化反应。每一种作物的生长发育对空气温度都有一定的要求，都有温度的“三基点”，即最低温度、最适温度和最高

温度。在最适温度下,植物生长发育迅速;在最低和最高温度下,植物停止生长,但尚能维持正常的生命活动,如温度继续降低或升高,植物就会受到危害甚至致死。由于植物本身是一个变温的有机体,其温度的变化决定于环境温度的变化,因此,环境温度对于作物的生长、发育和产量都会产生重大的影响。此外,空气温度的变化还会引起综合环境中其他因子(如湿度)的变化,而环境因子综合体的变化,又影响到植物的生长、发育及产量。

(三) 空气湿度

空气湿度也是影响植物生长发育的主要因子,空气湿度太高会使植物生长发育受阻,易产生病虫害,也会造成花粉黏滞,生命力降低;空气湿度太低,也会降低花粉的生命力。

(四) 空气中 CO_2 浓度

空气中 CO_2 浓度对植物的生长和发育起着重要的作用。 CO_2 亏缺不仅影响作物光合作用,而且影响根系的发育,会造成作物减产和品质下降。

二、温室环境因子调控技术的发展

温室对光环境的调控主要是遮阳和补光,对 CO_2 浓度的调控主要是施 CO_2 气肥和通风,下面主要介绍温室热湿环境因子调控技术的发展。

温室本身就可以视为一种最基本、最简单的热湿处理技术。从罗马时代的手推车温室到当今配备了先进自控系统的温室,对温度和湿度的控制仍是温室技术最核心的部分之一。温室由于其封闭栽培的特点,其室内温湿度相对于普通空调房间有很大的不同。根据对太原市农业温室在种植过程中的实测数据,夏季在室外气温 35°C 时室内温度接近 50°C ,在凌晨或灌溉后相对湿度最高可达到 100%;冬季夜间在室外气温 -15°C 时室内温度不足 0°C ,在有充足太阳辐射的情况下,室外气温在 $-5\sim 0^\circ\text{C}$ 时室内气温也可达 $25\sim 30^\circ\text{C}$,相对湿度均保持在 75%~100%。夏季的高温高湿环境对植物正常生长极为不利,极易发生病虫害,冬季的低温易致植物受冻。根据相关文献,冬季室内需保证 5°C 的温度方能保证幼苗存活。所以,如

何经济高效地保证温室最基本的热湿环境一直是人们研究的重点。

(一) 传统空调方法

1. 自然通风

在当前的设施农业中,大多还是采用传统的空调方法来调节温室内的热湿环境,最简单的为自然通风。根据现场调查发现,现在农民的温室基本没有配备专门的通风空调设备,在夏季一般靠直接掀开前屋面 PVC 膜底部并打开北墙通风孔自然通风,但是这一方法的效果甚微。原因有三:一是并未形成良好的气流组织,北墙通风孔的面积较小,几乎只是一个单面的通风;二是夏季室外气温并不低,一般达到 30°C 以上,除非大风量置换,否则很难达到合适的温湿度要求;三是热湿气体主要集中在室内上部空间而不易置换,而底部较低温度空气却获得了更好的换热条件,所以,温室整体热湿交换效果并不强。

2. 机械通风

在自然通风的基础上加入风机形成强制的机械通风可获得较好的效果。从夏天降温除湿的角度来说,排风口的最佳安装位置在温室上部,因为热湿空气的密度比干燥空气小而向上“浮”,聚集在上部。热湿空气直接从温室顶排除后在该区域形成负压,可将室外较低温度和湿度的新风从底部通风孔吸入,置换室内的高热高湿气体,从而形成一个循环的气流。但是当室外温湿度较高时,这样的方法对室内降温除湿效果并不明显。

3. 等焓加湿降温

现在大型温室的降温设备主要是利用蒸发冷却降温原理。但是蒸发降温导致了另一问题:原本高湿度的温室变得更加潮湿。根据实现降温目的所采用的技术设备不同,这类设备可分为湿帘—风机降温系统和微雾降温系统两大类。

湿帘—风机降温系统由湿帘、供回水系统、风机、电动控制系统等主要设备组成。利用水的蒸发,空气等焓增湿降温。系统通过循环供水将水送到湿帘顶部,均匀淋湿整个湿帘,从而将湿帘的表面湿润。当空气通过低温潮湿的湿帘时,水与空气充分接触,使空气的温度降低,同时空气携

带走的液滴蒸发进一步降低空气温度,但空气绝对含湿量升高,温室室内湿度增加。

微雾降温系统由加压泵、过滤器、雾式喷嘴、管路及电控部分等组成。其工作原理是水经过滤器过滤后进入压力泵,加压后的水通过管路输送到喷嘴,以高速度喷出形成雾状的细微雾粒充分与空气混合,在蒸发过程中吸热,从而达到降温目的,然后将潮湿空气排出室外。这一系统降温成本低,配合遮阳系统综合使用降温效果明显,降温能力在 $3\sim 10^{\circ}\text{C}$ 。适用于相对湿度较低的地区和自然通风较好的温室,但是这种降温也会极大地增加室内湿度。

4. 等湿加热设备

在冬季,当室内温度不足以保证植物正常生长或存活时,多采用热风机、热风炉和热水供暖加温,也有少数采用电供暖和蒸汽供暖的。

热风炉与热水加温系统相比,运行费用较高,但其一次性投资少,安装方便,尤其适合于冬季供暖时间短的地区和小面积单栋温室,在长江流域以南地区使用较为普遍。可配自动控温系统和严格的保护功能,设定温度自动启动和关机,实现自动运行。如果配合风管长距离送风,供暖区域温度将更为均匀。

热水供暖系统主要由提供热源的锅炉、输送管道、循环水泵、散热器以及各种控制配件和调节阀门等组成。由于热水的热容较大,温度调节可达到较高稳定性和均匀性,与热风和其他供暖相比,虽一次性投资较大,但热损失较小,运行费用低,一般适合于冬季室外温度在 -10°C 以下且加温季节时间较长的地区。在我国北方地区和长江流域对面积较大的温室群供暖,大都采用热水供暖系统。

(二) 现代空调方法

1. 太阳能—土壤加温系统

太阳能的应用与发展已经过了相当长的时间,据相关资料记载可以追溯到1900年的美国。由于太阳能是完全绿色能源,所以,各国都大力支持这方面的研究,比利时对太阳能系统的扶持力度甚至达到了50%。我国现