

文章编号: 1006-4354 (2004) 03-0001-04

# 农业设施环境要素调控技术研究及应用现状

李化龙<sup>1</sup>, 尚小宁<sup>1</sup>, 刘新生<sup>1</sup>, 孙智辉<sup>2</sup>, 李四虎<sup>1</sup>

(1. 咸阳农业气象研究所, 陕西咸阳 712000; 2. 延安市气象局, 陕西延安 716000)

**摘 要:** 综述了国内近年来有关农业设施环境中光照、温度、湿度、CO<sub>2</sub> 浓度等要素调控及应用方面的研究进展。讨论了日光温室生产中存在的主要农业气象问题及相应的解决对策。

**关键词:** 设施农业; 日光温室; 气象要素; 调控

**中图分类号:** S162.4

**文献标识码:** A

随着我国市场经济的不断发展,以高产、高效、优质为基本特征的设施农业栽培技术得到迅速推广,栽培面积超过 86 万 hm<sup>2</sup>[1]。设施农业与传统农业相比较,主要特点是设施农业具有外围护结构,其作用是对不利于农作物及畜、禽等生长发育的自然环境条件进行调控,以达到在不利自然条件或反季节条件下进行农业生产的目的。因此,光照、温度、湿度、CO<sub>2</sub> 浓度等农业设施环境要素的调控技术及应用效果在很大程度上决定着设施农业生产的成败和生产效益的高低。研究和掌握农业设施环境要素的变化特点及相关调控和应用技术,具有重要现实意义。

## 1 热环境调控技术及应用

### 1.1 保温技术及应用效果

1.1.1 外围护结构与热环境的关系 单屋面温室外围护结构包括采光面覆盖物和墙体两部分。墙体兼有隔热和储存、放热功能。研究发现<sup>[2]</sup>, 50 cm 厚的土墙,白天夜间均为吸热体。纯土质墙体建造厚度要求 100~150 cm。采用总厚度为 48 cm 空心夹层砖墙结构的异质复合墙体。白天温室升温阶段,墙体为热汇吸收热量,是吸热体。夜间降温阶段,内侧墙体为热源向室内释放热量,起到平衡调温作用。异质复合墙体,内侧由吸放热能力较强的材料组成蓄热层,外侧由导热、放热能力较差的材料(如加气砖)构成保温层,中间是轻质、干燥、多孔、导热能力极差的隔热层。据计算,中间夹层

为珍珠岩的墙体内侧在 15 时至次日 08 时放热期间,放热强度为 37.9 W/m<sup>2</sup>,无填充物的后墙仅 2.9 W/m<sup>2</sup>,储热保温能力低。采光面透光材料对温室的保温能力有重要影响。据观测,PVC 透光膜,对红外线透射率仅为 20%,而 PE 透光膜对红外线的透光率达到 80%左右,日光能量的 50%为波长 0.76~2.0 μm 的红外线,选择采光面材料时,除考虑透光性能外,保温性能也应是考虑因素。

双屋面单栋或连栋温室<sup>[3]</sup>采光面采用双层塑膜,可提高温室保温性能。双层塑膜结构的透光膜中间由风机充入空气,在两层塑膜之间形成一定厚度的气层,利用空气透光性强而导热率低的特性,白天太阳光透过时,降低采光面向外的热流量。据研究采用双层充气结构,采光面传热系数为 4.0 W/(m<sup>2</sup>·K),单层塑膜为 6.8 W/(m<sup>2</sup>·K),导热损率降低 41%,达到提高热能利用率的目的。

1.1.2 覆盖材料与热环境的关系 覆盖材料主要用于增加透光面夜间热阻。传统覆盖材料有草帘、蒲席、棉被、无纺布等。据研究,草帘保温为 5~6 °C,蒲帘 7~10 °C,双层草帘为 14~15 °C,棉被为 7~10 °C,草帘上加盖由 4 层牛皮纸复合成的纸被,保温能力还可提高 3~5 °C。室内架设保温幕(PE 膜或无纺布),有 1~3 °C 的保温能力。传统覆盖保温材料笨重、易吸水、易污染采光面、机械化操作困难,新型保温材料主要由微孔泡沫塑料、毛毡、蜂窝塑膜及防水材料构成,重量仅为传

收稿日期: 2003-12-31

作者简介: 李化龙 (1964-), 男, 陕西周至人, 高级工程师, 在读研究生, 主要从事应用气象研究。

统草帘的10%~30%，保温效果与草帘相当<sup>[4]</sup>。

1.1.3 地中热交换系统对热环境的改善 温室具有较好的密闭保温性能，寒冷的冬季，也常有因温度上升过高而需通风降温，热资源因通风降温而浪费。为蓄积白天富余热量并于夜间降温时补充室内热量不足，一些日光温室采用了地中热交换系统。系统在40~60 cm地下铺设通风管道，与轴流风机相连，白昼高温时段，风机使室内热空气从地中管道流过，向土壤层贮热，夜间温度过低时，风机使室内低温空气流过管道，由土壤加热空气，使气温升高。运行结果表明，白天贮热阶段，出风口温度较进风口温度降低6.5~7.5℃，夜间放热阶段，出风口较进风口温度升高4.5~5.3℃，从而达到改善温室昼夜热环境的目的<sup>[5]</sup>。在连续阴天情况下，仍具有提高夜间温度的能力。

1.1.4 微灌对改善温室热环境的影响 温室采用传统的大水漫灌灌溉方式，一方面灌溉用水温度较低，灌溉后引起地温大幅下降，另一方面用水量较大，水分蒸发消耗大量汽化热，恶化温室热环境。采用滴灌等微灌技术，可有效改善。以哈尔滨为例<sup>[6]</sup>，4月下旬温室滴灌比沟灌提高气温0.5℃，提高5 cm地温3.2℃，5月上中旬提高地温2℃左右，效果明显。

1.1.5 地膜覆盖对温室热环境的改善 自然条件下，地温高于气温。在温室内常为地温低于气温。长时间地温过低，使根系产生生理障碍，影响正常生长。采用地膜覆盖，使地温平均提高2~4℃，协调作物地下地上部分生长。地表覆盖地膜后2~3 min，膜下就有水气凝结，水气凝结形成的小水珠布满地膜下表面，使地膜对太阳辐射的反射率大为增加，可达到30%~40%，地膜对太阳能的透射率大大降低，从而影响增温效果的充分发挥。地膜生产引入无滴技术，抑制地膜下表面水汽凝结成滴，提高地膜透光率，对改善地温，特别是温室地温有积极意义。

## 1.2 增温技术及应用效果

当温室有可能出现接收和贮存的热量不足以维持作物生长所需温度的情况时，应考虑采用加热设备改善温室热环境条件。

1.2.1 燃烧加热技术 单屋面温室，采用在北墙

处安装烟道的形式，实现对温室的加温，所需设备和技术较为简单。现代化大型连栋温室，缺少单屋面温室墙体贮热及室外覆盖的保温条件，采用加热维持正常生产。

我国在大型温室发展初期，多以成套技术设备引进为主。受冬季蒙古高压的影响，我国大部分地区冬季气温比同纬度其它国家显著偏低。如东北地区1月份偏低14~18℃，黄淮地区偏低10~14℃，长江以南偏低8℃。受其影响，从国外引进的现代化温室，因运行成本过高很难盈利。例如，1996年，上海引进15 hm<sup>2</sup>大型温室，设备及配套费用500~900元/m<sup>2</sup>，运行成本3.48万元/hm<sup>2</sup>，其中30%~40%为燃料成本，冬季耗煤600~1200 t/hm<sup>2</sup>，处于不计折旧，勉强保本的经营状况<sup>[1]</sup>。研究开发适合我国能源消费水平和气候资源条件的温室加温技术显得尤为重要。

中国农业大学开发出华北型连栋塑料温室<sup>[7]</sup>，通过双层充气膜覆盖、活动式保温内幕、地中热交换、北山墙蓄热、双层充气卷帘等先进成熟技术的集成组装，形成了具有中国特色的现代化大型节能温室，使北京地区冬季加热期由5个月缩短至3个月，节能效果显著。

1.2.2 灌溉用水加热技术 西北干旱地区地下水位很低，大部分地区没有机井灌溉条件，主要靠抽黄引水灌溉。冬季属农业用水低谷期，不能保障温室灌溉用水，即使有蓄水池蓄水，也因冬季结冰而无法灌溉。日光温室柔性蓄水技术，较好地解决了干旱地区日光温室冬季灌溉用水问题<sup>[8]</sup>。在专用日光温室内建造柔性蓄水池，利用日光温室接收和贮存的能量，提高池内水温，避免水体冻结，便于灌溉，同时不使灌溉地段因灌溉而大幅降温。12月下旬室外气温-4.5℃条件时，室内气温27.5℃，水温达到10℃以上，可供8栋50 m×7 m温室一个生长期用水。

## 1.3 降温技术及应用

1.3.1 通风换气降温 单屋面日光温室，在室内温度较高时，通过换气窗口排出热空气，达到降温目的。对大型连栋温室，可通过风机和天窗实现换气降温。室内外温差较大时，降温效果明显。

1.3.2 遮阳降温 通过遮挡或反射采光面太阳辐

射的射入量达到降低室内温度的目的。采用遮阳网, 室内气温可降低  $2^{\circ}\text{C}$  左右。铝箔反射型遮阳幕依其铝箔面积所占比例不同, 遮阳率在  $20\% \sim 99\%$  可调<sup>[9]</sup>。

1.3.3 蒸发降温 利用水分蒸发吸收汽化热的原理, 降低温室温度, 方式有湿帘蒸发降温 and 雾化蒸发降温。

湿帘是由梭楞状纸板层叠而成的幕墙, 墙内有水分循环系统。借助轴流风机形成室内负压, 室外空气流经湿帘, 经湿帘内水分蒸发吸热, 形成低温气体流入室内。起到降温作用。降幅可达  $2 \sim 4^{\circ}\text{C}$ <sup>[10]</sup>。

雾化降温的基本原理是普通水经过滤后, 加压 ( $4 \text{ mPa}$ ), 由孔径非常小的喷嘴 (直径  $15 \mu\text{m}$ ), 形成直径  $20 \mu\text{m}$  以下的细雾滴, 与空气混合, 利用其蒸发吸热的性质, 大量吸收空气中热量, 从而达到降温目的。降温幅度可达  $7^{\circ}\text{C}$ , 降温效率较湿帘提高  $15\%$ <sup>[11]</sup>。蒸发降温的降温幅度与空气相对湿度密切相关, 理论上可达到湿球温度水平。

#### 1.4 变温管理技术及应用

根据作物光合和呼吸过程以及部分作物有“午休”现象的特性, 在温度管理上采用四段变温管理技术, 不但可以达到节能目的, 而且还可以获得最适产量。

四段变温管理的原理: 上午, 作物光合效率较高, 需要较高的温度, 使作物光合作用得到充分进行。午后, 作物需转化光合产物, 光合效率下降趋势, 需适当降低温度, 抑制呼吸。前半夜, 需转移同化产物, 如温度太低, 转移速率较慢, 需适当加温; 后半夜降低温度, 抑制呼吸消耗。

研究表明, 一些植物的节间长度与温差成反比。生产中为获得理想株型, 通过升高夜温, 降低昼温的方式调控, 温度管理模式在一品红等花卉生产中对塑造花卉株型效果明显。

## 2 光环境调控技术及应用

光环境调控是设施农业中仅次于热环境调控的另一重要措施。“有收无收在于温, 收多收少在于光”。光环境调控从补光、遮光实施相应技术。

### 2.1 反射补光

在单屋面温室北墙, 悬挂反光膜可改善温室光

照条件。反光膜幅宽为  $1.5 \sim 2.0 \text{ m}$ , 长度随室温长度而定。可改善北部  $3 \text{ m}$  内的光照和温度条件。使用时应与北墙蓄热过程统筹考虑。

### 2.2 低强度补光

对感光性作物, 为满足作物光周期需要而进行的补光措施。补光强度需  $22 \sim 45 \text{ lx}$ , 目的是缩短黑暗时间, 改变作物发育速度。

### 2.3 高强度补光

为作物光合作用而实施的补光措施。在室内光照小于  $3000 \text{ lx}$ , 可人工补光。

李萍萍等对镝灯 (生物效能灯)、高压钠灯、金属卤化灯 3 种光源测定结果表明<sup>[12]</sup>, 镝灯补光效果最好, 光谱能量分布接近日光, 光通量较高 ( $70 \text{ lx/W}$ ), 按照每  $4 \text{ m}^2$  安装一盏  $400 \text{ W}$  镝灯的规格, 补光系统可在大阴天使光强增加到  $4000 \sim 5000 \text{ lx}$ , 比叶菜类作物光补偿点高出 1 倍左右。

高压钠灯理论光通过量很大 ( $100 \text{ lx/W}$ ), 但实际测试结果不如镝灯, 同样安装密度条件下,  $400 \text{ W}$  钠灯下垂直  $1 \text{ m}$  处, 光强从  $2200 \text{ lx}$  提高到  $3200 \text{ lx}$  (镝灯可提高到  $5000 \text{ lx}$ )。钠灯偏近红外线的光谱能量的比例较大, 色泽刺眼, 不便灯下操作。金属卤化灯是近年发展起来的新型光源, 理论发光效率较高, 但测定结果不如钠灯, 且聚焦太集中, 不适合作为温室补光之用。

### 2.4 紫外线补光

紫外线中  $0.28 \sim 0.32 \mu\text{m}$  称为保健波段, 对动植物具有很强的生理效应。紫外线补光在畜、禽舍应用较多, 适宜剂量问题国内外争论较大。前苏联农业电气化研究所推荐剂量为  $50 \text{ mW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ , 游小杰等对鸡舍紫外线补光适宜量研究<sup>[13]</sup>。在  $50 \text{ mW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ 、 $233 \text{ mW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$  紫外线强度下, 与对照相比, 鸡的产蛋率分别提高  $3.2\%$  和  $7.6\%$ , 蛋壳厚度分别增加  $0.095 \text{ mm}$  和  $0.145 \text{ mm}$ , 平均蛋重增加  $4.74 \text{ g}/\text{枚}$  和  $6.78 \text{ g}/\text{枚}$ 。死亡率降低  $1.51\%$  和  $2.74\%$ , 效果不错。

玻璃、塑膜等透光材料对紫外线的吸收率较大, 温室内紫外线条件处于较低水平。文献表明, 因臭氧层破坏导致地面紫外线辐射增强, 对作物的不利影响研究较多<sup>[14]</sup>, 而温室紫外线的不足以及人工补充紫外线的研究不多。有研究认为, 茄子等作

物果实着色度与紫外线照度有一定关系。对温室番茄人工补充紫外线 B (UV-B), 可提高番茄红素含量 10%, 维生素含量 16%。UV-B 与红光复合处理, 番茄果实的含糖量、酸度、番茄红素的含量分别增加量 34%、35% 和 22.5%, 维生素含量与单独 UV-B 处理相当<sup>[15]</sup>。

### 3 湿环境的调控技术

湿环境调控有加湿和降湿操作过程。由于温室基本上都处于高湿环境, 加湿调控应用较少, 如需加湿, 借助降温操作中使用的湿帘、雾化等技术, 均可达到增湿效果。温室降湿可采用室内外换气、地膜覆盖、膜下灌溉、滴灌、化学吸水除湿和热交换除湿等技术。其中滴灌技术降低温室湿度比较经济有效。据研究<sup>[6]</sup>, 采用滴灌技术, 在 07—17 时通风期, 空气相对湿度比膜下灌溉降低 10%, 停止通风后, 膜下灌溉湿度达到 100%, 滴灌仅 85%。

### 4 CO<sub>2</sub> 浓度的调控

受密闭环境条件影响, 日出后作物开始光合作用, 大量消耗 CO<sub>2</sub>, 2 h 使温室内 CO<sub>2</sub> 浓度降到 300 ml/l 以下, 中午前后降到 200 ml/l。温室白天 CO<sub>2</sub> 含量不足, 人工增施 CO<sub>2</sub> 不仅可增产, 而且可改善品质。

温室 CO<sub>2</sub> 来源可归纳为有机质分解、炭等化石燃料类燃烧、液态和固态 CO<sub>2</sub> 气化、碳酸盐加稀酸的反应及畜菜、菌菜互补等方式。其中畜菜、菌菜互补是利用动物和菌内呼吸和生长过程放出 CO<sub>2</sub> 机制提高温室内 CO<sub>2</sub> 浓度。据研究, 在畜菜互补系统中, 维持温室 CO<sub>2</sub> 浓度 1 403~3 964 ml/l 的条件, 每头 80 kg 育肥猪可供应 21~39 m<sup>2</sup> 番茄的生长需求, 番茄产量和产值分别是对照的 2.4 倍和 1.4 倍, 增收效果非常明显<sup>[16]</sup>。

### 5 结语

随着设施农业调控技术不断发展, 设施农业生产中需要考虑的环境控制要素 (如土壤湿度, 矿物养分, 有害气体含量等) 将不断增多。调控手段已从单因子控制向综合考虑环境因子相互影响、以同一环境因子为基准 (如太阳辐射)、其它环境因子为变量进行处理的多因素环境控制方向发展, 并将专

家系统和人工智能控制等技术引入农业设施环境控制系统, 科技含量和自动化水平不断提高, 为农业设施环境调控技术的进一步发展奠定了技术基础。

### 参考文献:

- [1] 王松涛. 论我国设施园艺建设的宏观管理 [J]. 农业工程学报, 1999, (1).
- [2] 陈端生. 中国节能型日光温室建筑与环境研究进展 [J]. 农业工程学报, 1994, (2).
- [3] 周长吉. 双层充气塑料温室经济技术评价 [J]. 农业工程学报, 1999, (1).
- [4] 周长吉, 桂金花. 几种日光温室复合保温被温性能分析 [J]. 农业工程学报, 1999, (2).
- [5] 马承伟. 连栋温室地中热交换系统贮热加温试验 [J]. 农业工程学报, 1999, (2).
- [6] 乔亚文. 温室大棚蔬菜生产中滴灌带灌溉应用分析 [J]. 农业工程学报, 1996, (2).
- [7] 潘强. 华北型连栋塑料温室节能对策与实践 [J]. 农业工程学报, 1999, (2).
- [8] 苏德荣. 日光温室柔性蓄水池的设计 [J]. 农业工程学报, 2000, (1).
- [9] 周长吉. 缀铝箔保温幕保温性能测试分析 [J]. 农业工程学报, 1999, (3).
- [10] 马承伟. 沸腾炉式集中雾化降温系统的应用试验 [J]. 农业工程学报, 1998, (1).
- [11] 赵德菱. 温室内高压喷雾系统降温效果初探 [J]. 农业工程学报, 2000, (1).
- [12] 李萍萍. 智能温室综合环境因子控制的技术效果和合理的环境参数研究 [J]. 农业工程学报, 1993, (3).
- [13] 游小杰. 养鸡场人工紫外线补充光照适宜剂量的研究 [J]. 农业工程学报, 1997, (1).
- [14] 师皮生. 不同海拔地区紫外线 B 辐射状况及植物叶片紫外线吸收物质含量分析 [J]. 植物生态学报, 1999, (6): 529-535.
- [15] 王英利. UV-B 及红光对大棚蕃茄品质的影响 [J]. 西北植物学报, 2000, (4): 590-595.
- [16] 郭慧卿. 畜菜互补生态系统综合研究 (1)—CO<sub>2</sub> 动态模拟及畜菜配比选择 [J]. 农业工程学报, 1995, (2).