

基于沟式栽培的全封闭温室降温方法及蔬菜生长研究

张敏¹, 樊强², 党亚爱¹, 张富仓³, 薛绪掌⁴, 王国栋¹

(1. 西北农林科技大学 理学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 水建学院, 陕西 杨凌 712100;

3. 西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

4. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 利用地温相对恒定、受外界环境影响较小的特点,在全封闭温室内采用沟式栽培法,营造适宜作物生长的条件,研究了沟式栽培条件下温室内环境因子的差异以及其对蔬菜生长、产量和水分生产率的影响。结果表明,随着沟深的增加,植株生长点的温度和光照度降低。沟壁贴反光膜处理也表现相同的规律,但同深度沟内的温度和光照度明显升高。各处理的空气相对湿度保持在25%~60%之间,适宜作物生长。无反光膜处理植株长势优于反光膜处理。无反光膜条件下,基质距地表不同深度处理下产量均值表现为:0.5 m>0.7 m>0.25 m>0.9 m。耗水量表现为随着沟深增加而减小。无反光膜处理下水分生产率和耗水量则随着沟深度的增加而增加,贴反光膜处理均小于同深度无反光膜处理。沟式栽培法可解决全封闭温室的高温、高湿问题,同时大大提高了作物水分生产率。

关键词: 沟式栽培; 全封闭温室; 降温; 水分生产率; 蔬菜

中图分类号:S161.4¹

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.03.006

张敏,樊强,党亚爱,等. 基于沟式栽培的全封闭温室降温方法及蔬菜生长研究[J]. 灌溉排水学报,2017,36(3):32-38.

0 引言

全封闭温室是指除进出的门外,其他部分全部密封的温室^[1];该温室具有提高水资源和能源的利用效率、抑制病虫害发生及提高作物产量等优点,是设施农业的重要研究方向^[2]。然而夏、秋季的高温和强烈的太阳辐射使得全封闭温室内部形成不利于植物生长的高温环境,因此研究经济、有效地降温方法是保证夏季封闭温室内作物正常生产的核心,也是封闭温室环境研究中应着重考虑的问题。现有封闭温室的降温方法除常规的遮阳降温方法^[3]外,主要有带热交换器的太阳能烟囱^[4]、特殊滤光材料的屋顶^[5]、冷光源^[6]、“温差”热交换原理^[7]、空间延长和水循环^[11]等,这些方法虽有效降低了全封闭温室内的温度,但仍存在降温成本过高和区域性太强等不足。

地温是地表面及以下不同深度处土壤温度的统称,是十分有用的气候资源^[8],地源热泵、窑洞、地窖都是充分利用地温稳定、受外界气候影响较小的巨大潜能^[9]。沟式栽培作为一种新型的栽培方式,将地温资源引入设施栽培中,用以平衡植株周围的环境温度,在不消耗任何能源的条件下创造良好的植物生长条件^[10]。郭建武等^[11]通过挖定植沟降低了土壤温度,创造了适宜的根际生态环境。

通过测量全封闭温室内不同沟深环境下盆栽蔬菜生长期的冠层空气温度、空气相对湿度、光照强度、蒸腾以及产量等指标,分析沟式栽培模式下全封闭温室内植物冠层的降温效果以及作物的生长状况,探索一种新的蔬菜栽培模式,为有效提高封闭温室生产效率,实现周年生产提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验时间和地点

试验于2013年3—6月在陕西杨凌西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室的灌溉试验

收稿日期:2015-11-26

基金项目:国家863计划项目(2012AA101903,2011AA100504);陕西省自然科学基金基础研究计划青年人才项目(K3320215199);西北农林科技大学博士科研启动基金项目(2452015291)

作者简介:张敏(1982-),女,博士,主要从事环境生物物理学方面的研究。E-mail: 63863013@qq.com

通信作者:王国栋,教授,博士生导师,主要从事环境生物物理方面的研究。E-mail: Gdwang211@yahoo.com.cn

站日光温室内进行,该站位于北纬34°17',东经108°04',海拔506 m,所处地理位置属于暖湿带季风半湿润气候区。日光温室南北长12 m,东西宽3 m,脊高2.5 m,覆白色聚乙烯膜。

1.2 试验设计

采用基质栽培,试验用无孔花盆内径24 cm,盆高23 cm。试验基质采用草炭:珍珠岩按2:1均匀混和,每盆施有机肥500 g,与基质混匀后装满盆体。供试品种为柳叶蕹菜,每盆均匀置8穴,3月16日每穴播种3粒,基质表面用0.1 mm的铝箔反光纸覆盖,防止基质表面层蒸发。20 d后间苗,选长势一样的植株,每穴留1株。播种时保证盆栽内基质水分充足,试验过程中每隔3 d补水1次,补水量根据所有处理的蕹菜植株蒸腾耗水量的平均值进行,试验中期(5月3日)补营养液150 mL。

在全封闭实验区沿东西方向挖沟,沟长2.2 m,沟宽0.4 m,畦宽0.6 m。将基质表面置于低于地面0.25 m(记为0.25 m处理,下同),低于地面0.5 m(记为0.5 m处理),低于地面0.7 m(记为0.7 m处理)和低于地面0.9 m(记为0.9 m处理)共计4个处理,每个处理设5次重复。同时设置封闭温室内对照(记为CK_i处理)和温室外对照(记为CK_o处理),2个处理均不挖沟,设5次重复。不同光环境的设置如图1中A、B区所示。A区的处理不贴反光膜,B区4个深度沟内沿沟壁和沟底贴0.1 mm的铝箔反光纸,沟深分别为低于地面0.25 m(记为R0.25 m处理,下同)、低于地面0.5 m(记为R0.5 m处理)、低于地面0.7 m(记为R0.7 m处理)、低于地面0.9 m(记为R0.9 m处理),每个处理设置5次重复。

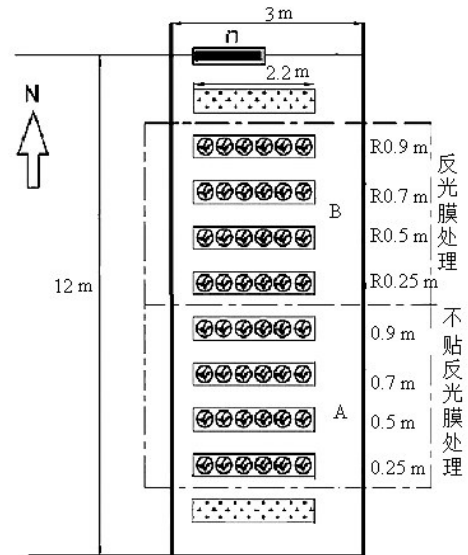


图1 试验布局图

1.3 试验观测项目和测定方法

1)小环境温湿度的测定:用温湿度采集系统,把传感器探头悬吊于盆栽植株的冠层上方0.1 m处采集整个生长期各处理的温湿度,每隔10 min读取数据并存储1次。

2)光照强度的测定:使用TES1339型专业级照度计,5月12日07:00—18:00间每隔1 h读数1次。

3)株高与茎粗的测定:每隔5 d记录蕹菜的形态指标,测量5次重复求其平均值,和第1次测量值的平均值求差即为该次蕹菜的株高、茎粗的增长量。用直尺从基质表面到植株生长点测量株高;用游标卡尺测量茎粗。每个处理取5株。

4)蒸腾量的测定:用ELT30KA型精度为1 g的电子天平称质量来测定。4月8日开始,每天上午08:00称质量1次,相邻2 d的质量求差为日蒸腾量,5次重复的平均值为不同沟深内蕹菜的日蒸腾耗水量。

5)叶绿素量的测定:采用SPAD-502型叶绿素仪测定各处理叶绿素量,每个处理测量5盆,每盆测6次。

6)光合生理参数的测定:选择晴天天气(5月26日),在自然光照条件下采用LI-COR产LI-6400便携式光合作用测定仪测定净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、和气孔导度(G_s)等光合生理参数,每个处理选择测量4株,每株3次重复。叶片水平上的水分利用效率(WUE_l)用 P_n/T_r 来表示^[12]。

7)总耗水量的测定:试验于3月16日播种,20 d后出苗,4月5日间苗、下沟,直到4月8日后开始称质量,期间每盆补水量相同,5月24日开始收获,通过称质量来计算总耗水量,即定植质量-收获质量-产量+各阶段补水的质量。

8)产量的测定:当植株高度超过15 cm时开始收割,采用多次采收、累计称质量法,各处理每盆蕹菜产量的累计值,取其平均数。

9)水分生产效率的测定:根据各处理产量与耗水量计算蕹菜的水分生产效率。

试验数据采用Microsoft Excel 2007及DPSV7.05软件进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 不同沟环境下植株冠层温湿度的日变化

图2分别给出典型晴天(图2(a))和多云天气(图2(b))下封闭温室内不同处理植株冠层位置温度的日变化动态。晴朗天气条件下,不同处理温度的日变化与外界温度的变化趋势基本一致,均于14:00达到最高值。在09:00—20:00之间,无反光膜的地沟处理随着沟深的增加,温度减小。0.25、0.5、0.7、0.9 m深度的白

天最高温度分别为51.31、41.56、38.20、30.19℃，而CKi和CKo的最高温度分别为49.13℃和27.80℃。夜间温度差异不明显，0.7 m处理温度最高，0.9 m处理次之，0.25 m最低，0.7 m处理和0.25 m处理最大温差为4.41℃。贴反光膜处理相比同深度无反光膜的处理的在8:00—20:00温度有了明显提高，各沟深处理日最高温度均超过45℃，明显不适宜植物生长。有反光膜的不同深度之间温度差异较无反光膜不明显，白天R0.9 m处理较R0.25 m处理低10.06℃，夜晚不同深度温度差值在1℃左右，和无反光膜的0.25 m和0.5 m深度处的温度值比较接近。可见反光膜在补光的同时大大提高了沟内的温度，削弱了地温带给沟内的低温环境。

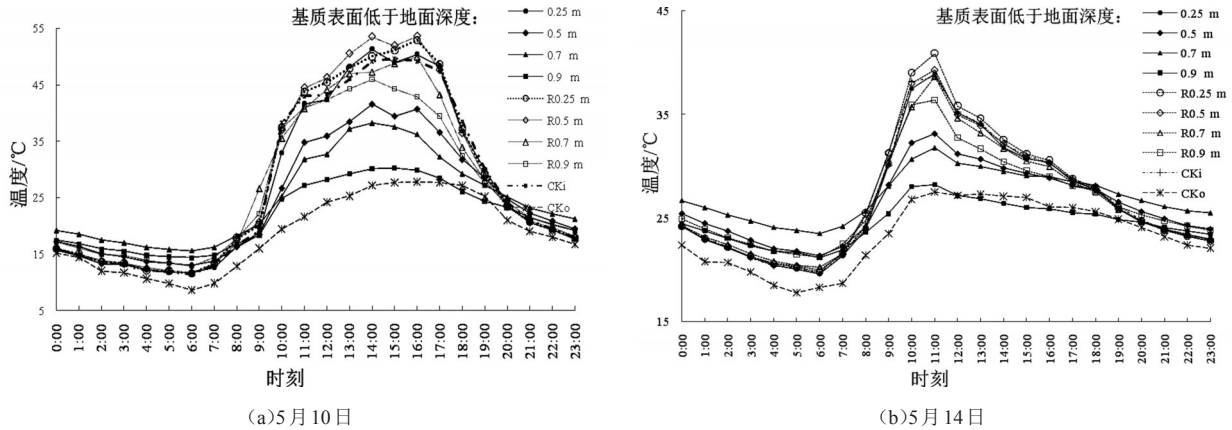


图2 不同沟环境下空气温度的变化

多云天气条件下，无反光膜处理的温度之间的差异没有晴天明显，0.25、0.5、0.7和0.9 m深度处理的白天最高温度分别为31.81、29.81、29.5、26.44℃，相比CKi和CKo的最高温度分别为32.11℃和27.5℃，差异不大。晚上温度变化规律与晴朗天气条件下基本一致，0.7 m处理和0.25 m处理最大温差为3.87℃。相同深度贴反光膜后温度有了一些增加，白天高温时段增幅分别为0.75℃(0.25 m)、1.38℃(0.5 m)、2.19℃(0.7 m)、4℃(0.9 m)。贴反光膜后温度随深度变化规律不明显，0.9 m沟和0.25 m沟温度差保持在1℃左右。

图3给出了不同沟环境下的空气湿度变化规律，其中，图3(a)为晴朗天气(5月10日)，图3(b)为多云天气(5月14日)。不同处理空气湿度的变化基本一致，从00:00开始略有上升，在03:00达到最大值，随后08:00左右开始大幅度下降，10:00左右降到最低，并保持一段时间，19:00—20:00湿度开始回升。多云天气条件下空气相对湿度较晴朗天气下有不同程度的下降。由于沟壁和沟底覆盖有塑料膜，有效阻止了深层土壤中的水分对空气相对湿度的影响，降低了沟内的空气相对湿度，各处理的空气相对湿度基本保持在25%~60%之间，适宜植株生长^[10]。

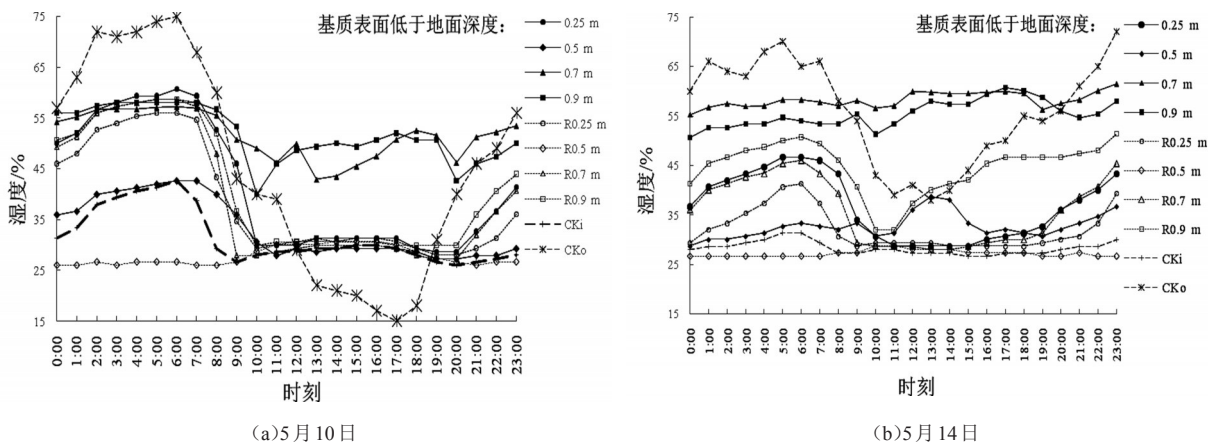


图3 不同沟环境下空气湿度的变化

2.2 不同沟环境下光照强度的变化

光照强度影响着作物的光合作用和产量高低^[13]。为研究不同沟环境下光照强度的日变化情况，在晴朗天气对各处理进行测量，结果如图4所示。各处理光照强度变化趋势基本相同，呈抛物线。CKo处理的光照强度最大，无反光膜处理光照强度随着沟深的增加而降低，0.9 m沟深明显低于其他处理。反光膜处理的光照强度比无反光膜处理明显增大。各处理光照强度表现为R0.5 m处理>R0.25 m处理>R0.7 m处理>

R0.9 m处理。温室内各处理的光照曲线有明显的波动,这和温室自身结构有关,自身骨架对进入温室光线的遮挡导致光照曲线不平滑,变化剧烈^[10]。

2.3 不同沟环境下盆栽蒸腾速率的日变化

选择典型晴朗天气(5月12日),从07:00—18:00每1 h快速称质量1次,相邻2次质量差的平均值为该处理这1 h内的蒸腾量,即蒸腾速率^[8]。不同沟环境下盆栽蔬菜蒸腾速率的日变化曲线如图5所示。

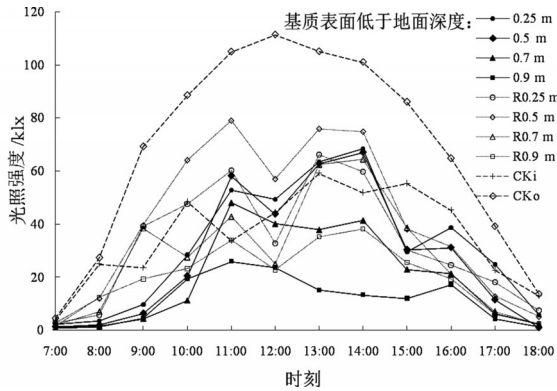


图4 不同沟环境下光照的变化

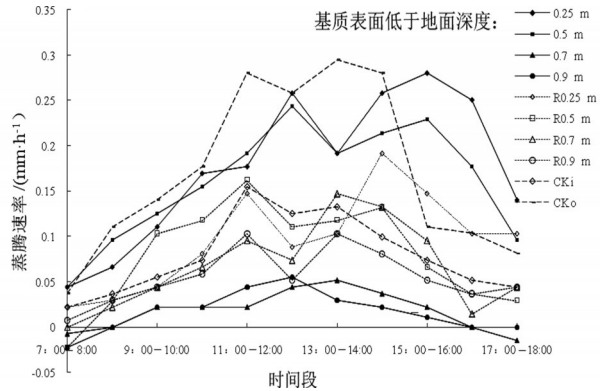
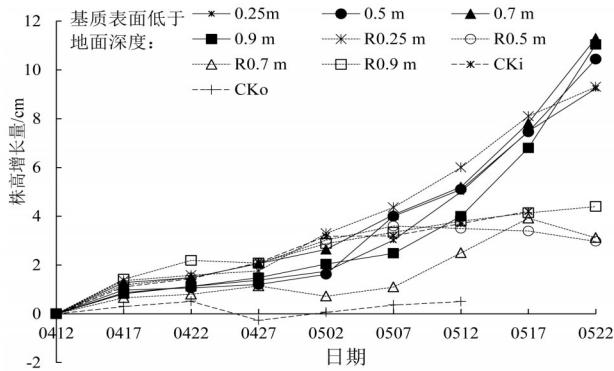


图5 不同沟环境下蒸腾的日变化

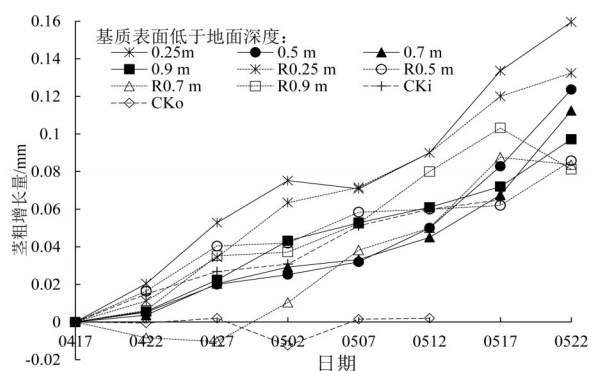
从图5可知,无反光膜处理下随着沟深度的增加,蒸腾速率总体上表现出减小的趋势,且蒸腾下降的幅度增大。0.25 m和0.5 m处理日蒸腾速率最大值分别为12.6 g/h和11.0 g/h,而0.7 m和0.9 m处理蒸腾速率最大值仅为23 g/h和25 g/h。CKo蒸腾速率在15:00—16:00以后明显小于0.25 m和0.5 m处理。而温室对照和贴反光膜处理的蒸腾速率非别介于0.25 m、0.5 m处理和0.7 m、0.9 m处理之间。贴反光膜后不同深度的蒸腾速率差异不如无反光膜明显。各处理的蒸腾日变化规律并没有满足EDWARDS等描述的单峰曲线(二次曲线)^[14],这是因为气孔导度随着温度的升高而增大。在30℃左右,气孔导度达到最大^[15],但随着温度的进一步升高,植物发生水分亏缺,从而引起叶片气孔部分或者全部关闭^[16],气孔导度减小,蒸腾速率下降。在中午12:00—14:00间,除0.7 m和0.9 m处理外,其他各处理的温度均超过了35℃,植株的蒸腾速率明显下降,之后随着温度的下降蒸腾速率回升。沟深温度越高,蒸腾速率变化越明显。

2.4 不同沟环境下蔬菜形态指标的变化

图6给出了不同处理蔬菜的形态指标的变化。从图6(a)可以看出,各处理的株高增长量存在明显差异,无反光膜处理各沟深内的植株较CKi和CKo生长迅速,其中0.7 m沟深内植株株高增长量一直保持最大,0.25 m处理的明显低于其他处理。由于沟内环境极端、蒸腾量大的处理,如CKi和CKo处理,植株水分亏缺极度严重,株高生长缓慢,甚至枯萎。而贴反光膜处理除R0.25 m处理略低于同深度无反光膜外,其余处理植株生长缓慢,到测量结束时株高增长量不到无反光膜处理的一半。



(a)株高增长量的变化



(b)茎粗增长量的变化

图6 不同沟环境下株高增长量及茎粗增长量的变化

不同深沟内植株的茎粗增长量之间存在较明显差别,如图6(b)所示。无反光膜的0.25 m深沟内植株茎粗增长量一直保持最大,明显高于其他处理。其余沟深处理前期增长量相当,4月27日后0.9 m处理的增长量略高于其他。到测量结束时茎粗增长量表现为:0.5 m处理>0.7 m处理>0.9 m处理。CKi处理的植株

前期增长较快,5月12日后增长停滞。CKo的株高增长量一直缓慢。

2.5 不同沟环境下日蒸腾量的变化

日蒸腾量从4月8日盆栽蔬菜出苗并放置到深沟内开始测量,连续测量35 d。表1列出了几种典型天气下不同处理蔬菜植株日蒸腾量的变化,其中4月17日为晴天,5月4日多云,5月6日小雨。

表1 不同沟环境下日蒸腾量的变化

日期	0.25 m	0.5 m	0.7 m	0.9 m	R0.25 m	R0.5 m	R0.7 m	R0.9 m	CKi	CKo
0417	36.0±7.21B	17.2±5.63 CD	13.6±2.97 D	13.4±1.95D	36.4±7.37B	37.4±7.77B	30±5.05B	26.6±5.13BC	36.2±5.63B	73.4±1.02A
0504	29.2±9.36A	26.2±11.45AB	13.2±1.30AB	12±3.67B	21.2±3.96AB	24.6±5.13AB	18.2±2.59AB	19±4.00AB	20.2±4.87AB	27.2±2.32AB
0506	15.4±3.05A	7.6±5.13BC	2±0.71D	5.4±0.89CD	2.4±1.67D	9.2±1.64BC	3±1.58D	10.6±1.67B	2.4±0.89D	1.6±0.67D

注 同列数据后不同字母表示差异极显著($P \leq 0.01$),下同。

由表1可知,晴朗天气和多云天气条件下,无反光膜处理的日蒸腾量随着沟深的增加而减小,差异比较显著。贴反光膜后同深度处理的日蒸腾量较无反光膜处理有较明显增加。R0.5 m处理的日蒸腾量最大,R0.25 m处理次之。晴朗天气条件下CKo日蒸腾量最大,为0.25 m处理日蒸腾量的2倍;CKi的日蒸腾量略大于0.25 m处理。多云天气CKo的日蒸腾量略小于0.25 m处理。下雨天气下日蒸腾量都比较小,无反光膜的日蒸腾量表现为:0.25 m > 0.5 m > 0.9 m > 0.7 m。同比CKi和CKo日蒸腾量差异不显著,分别为2.4 g和1.6 g。贴反光膜后除R0.9 m处理为10.6 g和R0.5 m处理为9.2 g外,其余处理日蒸腾量为不足3 g。

2.6 不同沟环境下蒸腾速率与环境因子的关系

为更精确地分析多个环境因子对蒸腾作用影响的综合效果和单因子的作用,分别以其他几个影响因子(白天平均光照强度、平均空气相对湿度、平均空气温度)为自变量,以蒸腾量为因变量(y),应用DPS软件得到蒸腾量与其影响因子的多元逐步回归方程,如表2所示。从逐步回归方程可以看出,除CKi外,其他沟环境处理得出的相关系数都在0.8以上,方程均达到显著水平。但不同沟环境处理影响蔬菜植株蒸腾的主要环境因子略有差异。0.25 m处理的蒸腾速率与平均温度相关性最强,其次是平均相对湿度;其他处理的平均温度、平均相对湿度和平均光照对蒸腾速率达到显著水平^[8,10]。

表2 不同沟环境下蒸腾速率与环境因子的逐步分析结果

处理	逐步回归方程	相关系数	F
0.25 m	$T_i = -8.013 + 0.285 T_a + 0.109 R_{ii}$	0.923	23.121
0.5 m	$T_i = -11.244 + 0.227 T_a + 0.283 R_{ii} + 0.056 I_n$	0.907	10.877
0.7 m	$T_i = 9.699 - 0.088 T_a + 0.142 R_{ii} + 0.053 I_n$	0.842	5.701
0.9 m	$T_i = -3.688 + 0.034 T_a + 0.045 R_{ii} + 0.101 I_n$	0.842	5.678
R0.25 m	$T_i = -6.040 + 0.177 T_a + 0.094 R_{ii} + 0.015 I_n$	0.856	6.415
R0.5 m	$T_i = 25.387 + 0.190 T_a - 1.136 R_{ii} + 0.088 I_n$	0.960	27.466
R0.7 m	$T_i = -5.460 + 0.092 T_a + 0.070 R_{ii} + 0.077 I_n$	0.832	5.250
R0.9 m	$T_i = -3.205 + 0.092 T_a + 0.0296 R_{ii} + 0.0567 I_n$	0.860	6.616
CKi	$T_i = 1.844 + 0.025 T_a - 0.091 R_{ii} + 0.0876 I_n$	0.757	3.132
CKo	$T_i = -42.028 + 0.971 T_a + 0.392 R_{ii} + 0.125 I_n$	0.942	11.746

注 T_i 为盆栽蔬菜的蒸腾速率(g/h), I_n 为各处理小环境中每小时的平均光照强度(klx), R_{ii} 为各处理小环境中每小时的平均空气相对湿度(%), T_a 为各处理小环境中每小时的平均温度(°C)。

2.7 不同沟环境下光合生理参数和叶绿素量的变化

不同处理光合生理参数和叶绿素量的差异见表3。无反光膜处理的相对叶绿素量均在35以上,并没有表现出和沟深度、光照强度的正相关关系。贴反光膜后除R0.25 m处理外其他处理的相对叶绿素量比较小。而CKo处理由于叶片枯萎,叶绿素量也比较小。

表3 不同沟环境下光合生理参数的变化

处理	叶绿素量/SPAD	光合速率/($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	蒸腾速率/($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	气孔导度/($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	水分利用效率/($\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$)
0.25 m	38.4±4.20AB	10.59±0.893E	4.86±1.053C	0.143±0.0369C	2.254±0.4413CD
0.5 m	39.3±2.73A	13.21±0.463D	11.52±0.790B	0.316±0.0417A	1.150±0.0546EFG
0.7 m	39.4±2.06A	12.73±1.211D	13.46±0.450A	0.308±0.0103A	0.947±0.1023FG
0.9 m	35.6±2.43B	10.66±1.032E	13.58±0.206A	0.292±0.0062A	0.785±0.0716G
R0.25 m	40.2±3.13A	9.65±2.189EF	4.44±2.803C	0.064±0.0417D	2.849±1.3066BC
R0.5 m	20.8±3.99E	15.03±1.274C	4.35±0.0.418C	0.051±0.0058D	3.501±0.5779AB
R0.7 m	17.7±4.81E	18.05±1.639A	11.26±0.089B	0.124±0.0021C	1.602±0.1344DEF
R0.9 m	29.7±4.98C	8.26±0.535F	4.92±1.724C	0.058±0.0235D	1.909±0.7782DE
CKi	35.2±2.88B	16.00±1.466BC	4.04±0.881C	0.044±0.0099D	4.093±0.8042A
CKo	24.4±7.86D	17.71±2.340AB	10.31±1.280B	0.189±0.0488B	1.749±0.0.3619DEF

从表3可以看出,除0.25 m深度处理外,无反光膜处理随着沟深度的增加,温度降低,光照强度减弱,蔬菜叶片净光合速率也逐步下降。0.5 m深度光合速率最大,0.7 m和0.9 m次之,0.25 m深度的最小,均小于CKi的15.72及CKo的17.07。贴反光膜后,除R0.9 m处理光合速率比较小,其余大于同样沟深度没有反光膜处理。

CKi的气孔导度和蒸腾速率均明显小于其他处理,无反光膜处理0.25 m深度的蒸腾速率和气孔导度最小。无反光膜处理除0.25 m深度外其余深度的气孔导度和蒸腾速率大于同样深度贴反光膜处理。这是因为贴反光膜引起沟内温度剧烈增加。在适宜的温度范围内,随着温度升高,气孔阻力下降,气孔张开,蒸腾作用旺盛;当气温突破某一门限,气孔开张度迅速减小,蒸腾速率下降^[17]。

叶片水分利用效率从作物叶片角度反映了单位蒸腾耗水的生产效率。各处理差异显著,CKi处理最大,为4.093 mol/mmol。无反光膜处理的水分利用效率随着沟深度的增加而减小,贴反光膜后同深度处理的水分利用效率较无反光膜处理有了较明显增加。

2.8 不同沟环境下产量、耗水量及水分生产率的变化

表4给出了封闭温室内盆栽蔬菜产量、耗水量及水分生产率的差异。由表4可知,沟内环境因子的差异导致盆栽蔬菜的产量和总蒸腾耗水量差异显著。无反光膜处理下产量的大小表现为:0.5 m处理>0.7 m处理>0.25 m处理>0.9 m处理,均大于CKi、CKo和同深度贴反光膜处理;总耗水量的变化是无反光膜处理随着沟深增加而减小,分别为CKo

表4 不同沟环境下产量、耗水量和水分生产效率的变化

处理	产量/g	耗水量/kg	水分生产率/(kg·m ⁻³)
0.25 m	41.270±1.074B	3.251±0.132A	12.70±0.38BC
0.5 m	61.180±2.727A	2.981±0.212AB	20.55±0.61AB
0.7 m	49.730±8.335AB	2.013±0.241DE	24.61±1.42A
0.9 m	35.270±12.077BC	1.428±0.221F	25.09±9.10A
R0.25 m	18.697±2.643DE	2.620±0.012BC	7.18±1.05CDE
R0.5 m	5.010±3.823E	1.911±0.277DE	2.48±1.52E
R0.7 m	6.413±4.613E	1.656±0.095EF	3.78±2.50DE
R0.9 m	22.640±5.923CD	1.880±0.091DE	12.07±3.15CD
CKi	23.323±7.644CD	2.300±0.071CD	10.52±2.93BC
CKo	14.267±7.714DE	3.235±0.216A	4.32±2.12C

的98.69%、93.66%、63.50%、45.03%。贴反光膜后总耗水量且除R0.9 m处理外均小于同深度无反光膜处理,贴反光膜处理之间的差异不如无反光膜处理明显,R0.25 m处理最大,R0.5 m处理和R0.9 m处理次之,R0.7 m处理最小;无反光膜处理的作物水分生产效率随着沟深的增加而增加,和耗水量规律表现相反。除了0.7 m和0.9 m处理的水分生产效率差异不显著外,其他处理间的差异都达显著水平。0.9 m处理最大,为CKi和CKo的243.47%和567.91%。贴反光膜处理作物水分生产效率均小于同深度无反光膜处理,R0.5 m处理最小,为0.5 m处理的12.27%。由此可见,在灌溉量保持一致的情况下,无反光膜处理的沟深越大,水分生产效率越高。

3 结论与讨论

1)随着沟深的增加,植株生长点的温度和光照强度大大降低,贴反光膜后表现相同的规律,但同深度沟内的温度和光照强度明显升高。各处理的空气相对湿度基本保持在25%~60%之间。无反光膜处理植株长势优于反光膜处理。

2)无反光膜处理下产量的大小表现为:0.5 m处理>0.7 m处理>0.25 m处理>0.9 m处理,均大于CKi、CKo和贴反光膜处理;总耗水量的变化是随着沟深度增加而减小。无反光膜处理下的沟深越大,水分生产率越高。贴反光膜后均小于同深度无反光膜处理。

由此可见,沟式栽培不仅可以在一定程度上解决封闭温室夏季高温的缺陷而不需要消耗任何能源,而且在灌溉量保持一致的情况下大大提高了作物水分生产效率。试验中补水量根据所有处理蒸腾耗水量的平均值进行,是在加水量相同的情况下得出的以上结论。由于日蒸腾量差异较大,试验后期外界对照和温室对照处理由于水分极度亏缺而出现枯萎,直接影响了产量。如果在试验中按土壤含水量保持在一定范围或按蒸腾量的多少进行加水,是否出现相同的结论需要进一步的试验和分析。

0.9 m处理的日蒸腾量一般在10 g左右波动,但也出现了负增长,也就是负蒸腾。出现这种现象的原因可能是多方面的,通过称质量计算日蒸腾量是在假设植株日增长量较小,可忽略不计的情况下进行的,但实际的试验中,蔬菜某个生长阶段或者某个环境因素范围内生长较快,生物量积累量略大于耗水量。也可能是因为空气中的水蒸气在温度最低的0.9 m深沟内凝结成露水附着在植株叶片上。

本试验用传统的计算水分生产效率的方法计算不同沟环境下蔬菜的水分生产效率,而在全封闭温室

中,蒸散和蒸发(蒸腾)过程中水并没有被消耗,可以被截获回收并循环利用,这样往往低估了全封闭温室内植株真正的水分利用效率。

参考文献:

- [1] 张敏,王国栋,薛绪掌,等. 全封闭温室降温方法研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2011,39(7):129-134.
- [2] 葛志军,傅理. 国内外温室产业发展现状与研究进展[J]. 安徽农业科学,2008,36(35):15751-15753.
- [3] 王吉庆,张百良. 几种降温措施在温室夏季降温中的应用研究[J]. 农业工程学报,2006,22(9):257-260.
- [4] SPEETJENS S L, VAN DER WALLE T, STRATEN G VAN, et.al. Watergy, towards a closed greenhouse in semi-arid regions-experiment with a heat exchanger[C]// International Conference on Sustainable Greenhouse Systems- Greensys, 2004: 845-851.
- [5] PATON C, DAVIES P A. The seawater greenhouse cooling, fresh water and fresh produce from seawater[C]//The 2nd International Conference on Water Resources & Arid Environments, 2006: 1-16.
- [6] 晓夫. 日本的植物工厂及其新技术[J]. 生态经济(学术版),2004,7:58-61.
- [7] 李霞,解迎革,薛绪掌,等. 温室内密闭小环境降温除湿效果及蒸腾水循环利用[J]. 农业工程学报,2010,26(8):254-259.
- [8] 张敏,薛绪掌,张富仓,等. 不同光环境和灌溉量对沟栽法青菜生长的影响[J]. 北方园艺,2014(7):39-44.
- [9] 郑荣进,庄麟,池清,等. 温室太阳能与地源热泵联合供暖系统热力学分析[J]. 农业机械学报,2013,44(4):233-238.
- [10] 张敏,张富仓,薛绪掌,等. 基于沟式栽培的全封闭温室降温方法及作物生长研究[J]. 农业机械学报,2014,45(12):187-193.
- [11] 郭建武,姜冬仓,薛爱利.“沟栽降温保湿法”定植防控番茄黄化曲叶病毒病的研究初报[J]. 河北农业科学,2011,15(5):42-43.
- [12] 张正斌,山仑. 作物水分利用效率和蒸发蒸腾估算模型的研究进展[J]. 干旱地区农业研究,1997,15(1):73-78.
- [13] 张新生,陈湖,傅友. 光照和温度对温室桃光合特性的影响[J]. 河北农业科学,2006,10(2):31-33.
- [14] EDWARDS W R N, BECKER P A. A unified nomenclature for sap flow measurements[J]. Tree physiology, 1997, 17(1): 65-67.
- [15] 李霞,王国栋,薛绪掌,等. 不同覆盖度下盆栽莴苣蒸腾规律的研究[J]. 节水灌溉,2009(4):1-5.
- [16] 张立军,刘新. 植物生理学[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [17] 刘静,李凤霞,王连喜,等. 灌溉对春小麦蒸腾速率的影响及其生理原因[J]. 麦类作物学报,2003,23(1):58-62.

Effects of Ditch Planting on Growth of Water Spinach (*Ipomoea aquatic Forsk*) in Closed Greenhouse

ZHANG Min¹, FAN Qiang², DANG Yaai¹, ZHANG Fucang³, XUE Xuzhang⁴, WANG Guodong¹

(1.College of Science, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3.Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 4.National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: The temperature of the ditch cultivation was relatively stable and less seasonally changeable, so it was applied to create suitable temperature condition in closed greenhouse for crop growth. This paper compared the difference of environmental factor under different ditch depth, and analyzed the influence of growth, yield, and water productivity in water spinach. The results indicated that the temperature and illumination decreased with the increase of ditch depth. There were similar rules with light-reflecting film while the temperature and illumination were higher than those at the same ditch without light-reflecting film. The humidity remained between 25%~60% which was suitable for the plant growth. The plant height and stem diameter of none reflecting film were better than those with reflecting film. The yields of without light-reflecting film at different ditch depth were 0.5 m treatment > 0.7 m treatment > 0.25 m treatment > 0.9 m treatment, and was larger than the other treatments. Water consumption decreased with the increase of ditch depth. The water consumption and productivity increased with the increase of ditch depth and were fewer than those the none light-reflecting film at the same ditch depth. Therefore, the ditch cultivation is not only applicable for solving the problem of high temperature in summer in closed greenhouse, but also could improve the water productivity greatly.

Key words: planting with ditch; closed greenhouse; cooling; water productivity; water spinach

责任编辑:陆红飞