

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.12.028

基于沟式栽培的全封闭温室降温方法与作物生长研究*

张敏¹ 张富仓² 薛绪掌³ 李霞¹ 王国栋¹

(1. 西北农林科技大学理学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100; 3. 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,根据蒸腾量进行补充灌溉,营造适宜作物生长的条件,研究不同沟深栽培条件下温室内环境因子的差异及其对小白菜蒸腾速率、产量和水分生产率的影响。结果表明:高温环境下,0.7 m和0.9 m深度处理的温度较温室内对照CKi有明显的降低,最大温差大于20℃;光照强度随着沟深的增加而减弱,但0.9 m深度处理的光照强度仍能满足光合作用的需求;空气相对湿度基本保持在25%~75%之间,适宜植株生长;水分生产率的大小在各处理中表现为0.9 m>0.7 m>0.5 m>0.25 m>CKi>CKo。高温季节0.7 m和0.9 m的深度更适宜小白菜的生长。沟式栽培法可解决全封闭温室的高温、高湿问题,同时可提高作物水分生产率。

关键词: 全封闭温室 沟式栽培 降温 水分生产率

中图分类号: S162.5⁺5; S625.5⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)12-0187-07

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^[1-2]。该温室具有提高水资源和能源利用效率、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^[3-4]。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秋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^[5]外,主要有带热交换器的太阳能烟囱^[6-7]、特殊滤光材料的屋顶^[8-9]、冷光源^[10]、“温差”热交换原理^[11]、空间延长和水循环^[1]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^[12],地源热泵、窑洞、地窖都是充分利用了地温稳定、受外界气候影响较小的潜能^[13-14]。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。郭建武等^[15]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,发现当温室大棚平均最高温度为33~36℃时,利用沟栽法定植可使番茄根部5~25 cm地温稳定在28℃以下;沟内土壤相对湿度为60%~80%时,5 cm处地温均可降至28℃以下,但该方法仅降低了根际温度,没有对冠层和叶面的温度变化做深入研究,且未涉及作物产量和水分生产率。

本研究通过测量全封闭温室内不同沟深处盆栽小白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,为有效提高全封闭温室生产效率,实现周年生产提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料与方法

试验于2013年6月—2013年7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节水灌溉试验站内进行(东经108°04',北纬34°17',海拔高度506 m),试验用全封闭日光温室南北向长12 m,东西向长3 m,脊高2.5 m,覆白色聚乙烯膜。

试验用盆高为23 cm,内径24 cm。采用基质栽

收稿日期:2013-12-23 修回日期:2014-03-13

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA101903、2011AA100504)和西北农林科技大学基本科研业务费青年资助项目(Z109021202)

作者简介:张敏,博士生,主要从事环境生物物理学研究,E-mail:63863013@qq.com

通讯作者:王国栋,教授,博士生导师,主要从事环境生物物理学研究,E-mail:Gdwang211@yahoo.com.cn

培,草炭:珍珠岩按体积比 5:2 均匀混和,每盆装入等量基质,并施尿素 4 g、复合肥 4 g 与基质混匀。供试蔬菜为小白菜 (*Brassica rapa* L. *Chinensis* Group.), 每盆均匀置 13 穴,每穴播 3 粒,6 月 25 日播种。3 d 后出苗,间苗选长势一样的植株,每穴留 1 株。为防止水分蒸发,用厚度为 0.1 mm 的铝箔反光膜覆盖基质表面。播种时等量灌水以保证盆内基质水分充足,试验进行过程中根据各处理植株蒸腾情况每 2 d 灌水 1 次,灌水量为 2 倍的蒸腾量。

在全封闭温室内的实验区沿东西向挖多排不同深度的沟,每条沟长度为 2.2 m,沟宽 0.4 m,各条沟间隔 0.6 m,如图 1 所示。将盆栽装置的基质表面分别置于深沟内低于温室地面 0.25 m、0.5 m、0.7 m 和 0.9 m 处,共 4 个深度处理,每条沟放置 5 盆植株。同时分别在全封闭温室内、外设立对照组 CK_i 和 CK_o(不挖沟,5 盆重复)。为防止沟壁脱落和沟内土壤水分对空气湿度的影响,在沟壁和沟底均覆盖塑料膜。

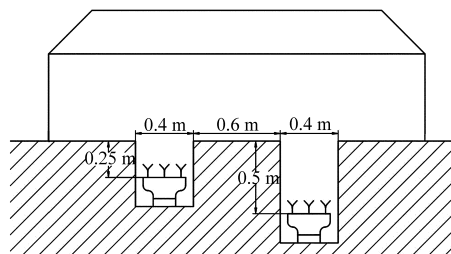


图 1 试验布局图

Fig. 1 Layout of experiment

1.2 测定指标与方法

利用温、湿度采集系统测量整个生长期各处理植株冠层的温度和湿度,将传感器悬挂于沟内植株冠层上方 0.1 m 处,测量周期为 10 min;采用 TES1339 型照度计测定植株冠层的光照强度,选择典型晴朗天气,测量时间为 07:00—17:00,每隔 1 h 读取数据一次;试验结束时记录株高及叶片数作为小白菜的生长指标;用 ELT30KA 型(精度为 1 g)电子天平测定蒸腾量。每天早上 08:00 盆栽装置称量 1 次,相邻 2 d 的称量值做差,取 5 次重复的平均值为该沟深处理的日蒸腾量。选择典型晴朗天气,从 07:00—17:00 每隔 1 h 称量 1 次,相邻 2 次称量差值的平均值为该处理盆栽小白菜 1 h 的植株蒸腾量,即为蒸腾速率;通过称量法计算总蒸腾量,具体计算方法是定植称量值与各阶段补水的总质量之和,再减去收获称量值与产量即为总蒸腾量。水分生产率小白菜产量与净蒸腾量的比值^[16-17],单位为 kg/m³。

试验数据以 DPS V7.05 软件进行差异显著性检验和回归分析。

2 结果与分析

2.1 冠层温、湿度变化

2.1.1 不同季节各处理气温变化

全封闭温室内沟式栽培试验从 3 月份开始,历时近 6 个月。经实际测量,全封闭温室内的环境对各深度沟内的温度影响较小。在 4 月 7 日和 7 月 16 日晴朗天气下,测量不同处理植株冠层空气温度和外界温度的变化,各处理日最高、最低温度如表 1 所示。结果表明各处理温度变化与温室内温度变化趋势基本一致,两者均随着外界温度的升高而逐渐增大,沟深度越大,受外界气温变化的影响越小,尤其是深度为 0.7 m 和 0.9 m 处理日最高温度的增幅明显低于 CK_o 处理。4 月 7 日沟内各处理日最高温度均高于 CK_o 的温度,而日最低温度维持在 9℃ 左右,各处理温差不超过 2℃,但均高于 CK_i 和 CK_o 温度,在春天的寒冷夜晚起到了良好的保温效果。7 月 16 日深度为 0.7 m 和 0.9 m 处理的日最高温度分别为 40.19℃ 和 37.75℃,远低于 CK_i 和 CK_o 温度。夜晚 4 个不同深度处理的日最低温度和温室内外温度相差较小,表明在夏、秋季的高温天气下,沟深较大的处理极大地降低了封闭温室植株冠层附近的温度,为植株生长营造了良好的温度环境。

表 1 4 月 7 日和 7 月 16 日不同处理空气最高和最低温度的变化

Tab. 1 Variation of maximum and minimum temperature under different treatments on April 7 and July 16 ℃

日期	温度	不同深度处理					
		0.25 m	0.5 m	0.7 m	0.9 m	CK _i	CK _o
04-07	最高温度	41.19	26.81	22.50	19.75	38.31	19.20
	最低温度	8.56	9.94	8.50	8.25	3.63	1.90
07-16	最高温度	53.75	48.13	40.19	37.75	54.88	45.44
	最低温度	20.19	21.56	22.19	22.50	20.13	18.81

2.1.2 典型天气下冠层温、湿度变化

为研究典型天气条件下不同处理植株冠层温、湿度的日变化规律,分别在晴朗天气(7 月 5 日)和多云天气(7 月 9 日)下进行测量,结果如图 2 所示。晴朗天气各处理温度变化与 CK_o 气温的变化趋势基本一致(图 2a),从 09:00~20:00,各处理温度差异显著,温度升高的幅度随着沟深的增加而明显减小。CK_o 和 CK_i 的日最高温度分别为 43.81℃ 和 57℃,深度为 0.25、0.5、0.7 和 0.9 m 处理的最高温度分别为 61.25、49.50、41.69 和 38.81℃。除深度为 0.7 m 和 0.9 m 处理外,其他处理的植株冠层温度长时间保持在 35℃ 以上,极不适宜植株生长。夜

晚各处理之间的温度差异较小,最大温差不超过 2℃。多云天气(图 2b),不同沟深温度升高的幅度较晴朗天气小,沟的深度和该深度处植株冠层空气温度的相关性不显著。CKo 和 CKi 的日最高温度分别为 35.63℃ 和 44.81℃,深度为 0.25、0.5、0.7 和 0.9 m 处理的日最高温度分别为 37.94、39.5、34.63 和 33.94℃。夜晚温度变化较晴天明显,0.25 m 深度内植株冠层空气温度最高,0.7 m 处理次之。0.25 m 处理和外界(CKo)处理最大温差为 3.88℃。

从温度变化曲线还可以看出,无论晴朗天气还是多云天气,白天深度 0.9 m 处理内植株冠层的温度均低于外界温室外的温度,即使在 7 月强烈的日光照射下,温室外气温超过 45℃,室内气温高于 60℃时,深度 0.9 m 处理内植株冠层的空气温

度还能维持在 40℃ 以下,有效降温达 20℃ 以上,可见通过增加沟深可很好地控制植株冠层的空气温度。

不同处理空气相对湿度的变化如图 3 所示。晴朗天气下(图 3a),从 00:00~04:00 各条沟内的空气相对湿度保持在较高的范围,随着温度的升高不断下降,于 10:00 降到最低,19:30 以后湿度开始回升,各处理沟内空气相对湿度的变化规律基本一致。多云天气条件下(图 3b)空气相对湿度较晴朗天气的变化幅度小。沟的深度和对应沟内植株冠层的空气相对湿度不具有线性相关关系。沟壁和沟底覆盖的塑料膜有效阻止了深层土壤中的水分对沟内空气相对湿度的影响,使得各处理的空气相对湿度基本保持在 25%~75% 之间,适宜植株生长。

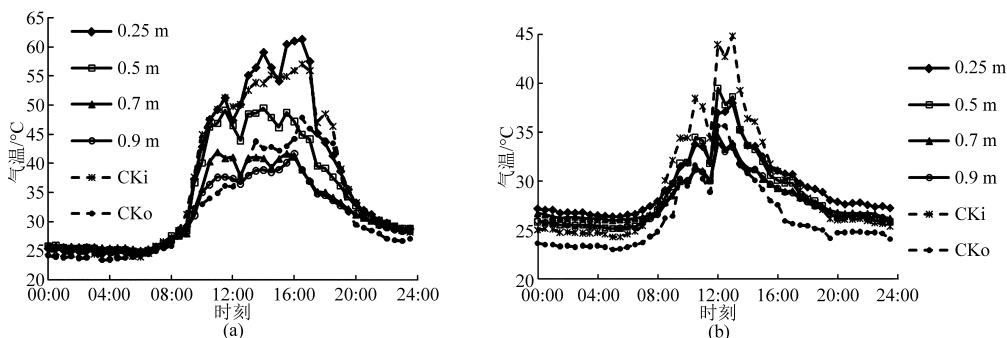


图 2 不同处理空气温度的变化

Fig. 2 Variation of temperature under different treatments

(a) 晴朗天气(7月5日) (b) 多云天气(7月9日)

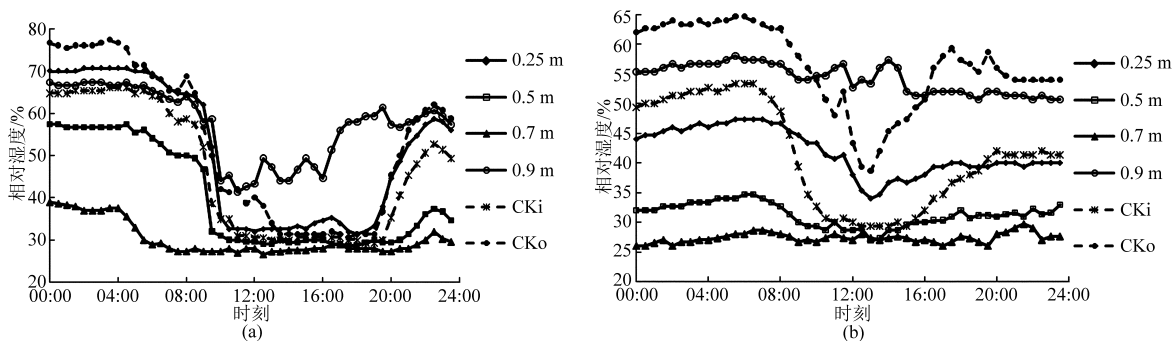


图 3 不同沟深内空气相对湿度的变化

Fig. 3 Variation of humidity under different treatments

(a) 晴朗天气(7月5日) (b) 多云天气(7月9日)

2.2 光照强度变化

温室内的沟式栽培虽然能够降低植株冠层的温度,但受沟壁遮荫的影响,沟内光照强度被不同程度地减弱。光照强度直接影响植株的光合作用,进而通过影响植株体内碳水化合物的积累而影响植株的生长发育;且温室内光照强度的大小还会影响小环境内的温度、湿度和空气成分等环境因子^[18-19]。晴朗天气(7月27日)下不同处理植株冠层光照强度的日变化规律曲线如图 4 所示。由图 4 可知,各处

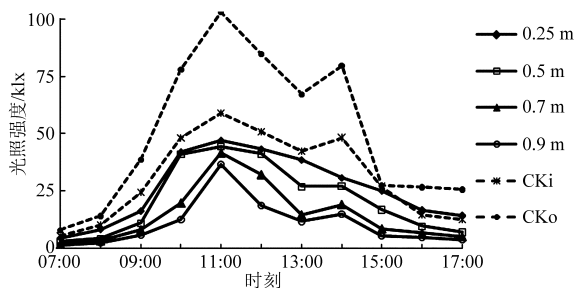


图 4 不同处理光照强度的变化

Fig. 4 Variation of illumination under different treatments

理的光照强度基本呈抛物线变化,沟内各处理的光照强度随着沟深度的增加而降低,由于温室自身框架结构和覆膜表面的灰尘以及温室内雾气水滴的影响,导致各处理光照曲线起伏变化。11:00 各处理的光照强度达到峰值,各深度沟内的光照强度分别为无沟深温室内的 79.81%、75.39%、70.82% 和 62.03%。12:00 以后,天空云朵增多,对温室外处理影响较大,光照强度变化剧烈。温室外对照 CKo 的光照强度最大,温室内对照 CKi 次之,平均透光率为 61.92%。深度 0.9 m 处理的沟深最大,因而进入沟内的光照强度最小,日平均光照强度仅为 CKi 的 30.23%。

2.3 典型天气下小白菜日蒸腾量变化

3 种典型天气下不同处理小白菜的平均日蒸腾量如图 5 所示,其中 7 月 20 日为晴朗天气,7 月 26 日为多云天气,7 月 8 日小雨。由图 5 可知,3 种典型

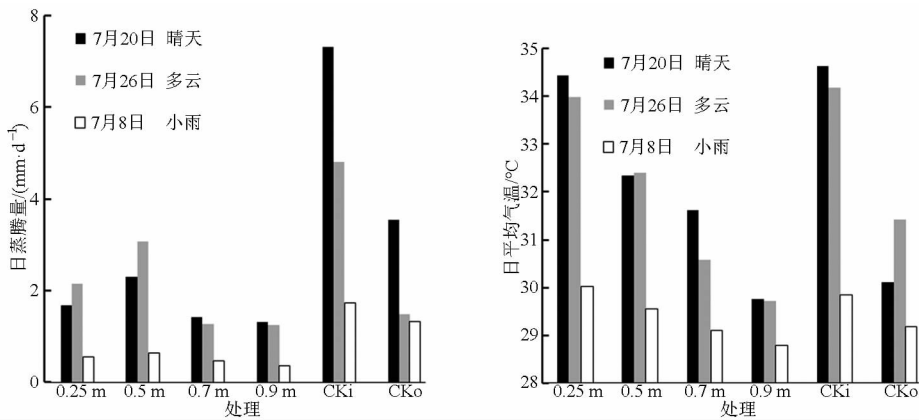


图 5 不同处理小白菜日蒸腾量和日平均气温的变化

Fig. 5 Variation of daily transpiration of Chinese cabbage and average temperature under different treatments

2.4 不同处理小白菜蒸腾速率日变化

图 6 为典型晴朗天气(7 月 27 日)不同处理盆栽小白菜蒸腾速率的日变化曲线。从图 6 可以看出,随着沟深的增加,小白菜蒸腾速率总体表现出减小的趋势。各处理蒸腾速率的峰值和出峰时间有明显差别,深度为 0.25 m 和 0.5 m 处理的蒸腾速率最大值分别为 0.465 mm/h 和 0.398 mm/h,而深度为 0.7 m 和 0.9 m 处理的蒸腾速率差异不明显。CKi 的蒸腾速率远高于不同沟深处理,最大值为 1.062 mm/h,出现在 11:00~12:00。这是因为除深度为 0.9 m 和 CKo 处理外,其他各处理在 12:00~14:00 的温度都超过了 35℃,高温导致植株体内发生水分亏缺,引起叶片气孔部分或者全部关闭^[20],使蒸腾速率明显下降。14:00 后温度下降,蒸腾速率回升,表明小环境内温度越高,蒸腾速率变化越明显。各处理盆栽的蒸腾速率与日蒸腾量的变化不完全一致,主要原因是蒸腾速率反映 07:00~17:00 之间不同处理植株每小时蒸腾的变化情况,而日蒸腾

天气下日蒸腾量表现为 CKi 最大,深度 0.9 m 处理最小,二者间差异显著。除深度为 0.25 m 和 0.5 m 的处理外,其余处理晴朗天气的日蒸腾量高于多云天气。7 月 26 日 CKo 的日蒸腾量仅为 1.482 mm/d,处于深度为 0.25 m 和 0.7 m 处理之间。在晴朗天气和雨天天气状况下,各处理日蒸腾量表现为:CKi > CKo > 0.5 m > 0.25 m > 0.7 m > 0.9 m。植株蒸腾不仅与沟内的温度变化有关,还受湿度、光照等因素的影响,因此各处理日蒸腾量的变化和其植株冠层日平均气温的变化没有表现出很好的相关性。典型天气条件下沟内各处理的日蒸腾量与沟深的关系也不明显,由于深度为 0.25 m 沟内日平均温度远高于深度为 0.5 m 的处理,晴朗和多云天气条件下日平均温度超过 34℃,直接导致叶片气孔关闭,蒸腾速率下降,日蒸腾量也明显减小,因此深度为 0.5 m 处理的日蒸腾量略高于深度为 0.25 m 处理。

量是 24 h 蒸腾速率的累积值。

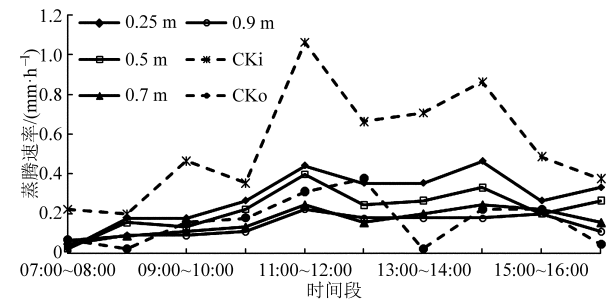


图 6 不同处理小白菜蒸腾速率的日变化

Fig. 6 Change of Chinese cabbage transpiration rate under different treatments

2.5 蒸腾速率与环境因子的关系

植物的蒸腾作用由其自身生理特性决定,同时在很大程度上受光照、空气相对湿度和大气温度等环境因素的影响^[21-22]。这些因素相互影响,共同作用于植物体^[23-24]。为更精确地分析多个环境因子对小白菜蒸腾作用的影响,本文以蒸腾速率为因变量(T_t),以白天平均光照强度(I_n)、平均空气相对湿

度 (R_H) 和平均空气温度 (T_a) 为自变量, 利用 DPS 数据处理软件, 建立不同沟深内植株的蒸腾速率与各环境因子的多元逐步回归方程(表 2)。从表 2 可以看出, 不同沟深内影响盆栽小白菜植株蒸腾的主要因子略有不同, 温室内对照 CKi 的蒸腾速率只和

平均温度、平均空气相对湿度显著相关; 其他各处理的蒸腾量与小环境平均温度、平均湿度以及平均光照强度极显著相关。除 CKo 的决定系数为 0.556 外, 不同沟深处理的逐步回归方程的决定系数 R^2 均在 0.8 以上, 达到显著水平。

表 2 不同处理小白菜蒸腾速率与环境因子的逐步分析结果

Tab. 2 Stepwise regression analysis of transpiration rate of Chinese cabbage and environmental factors under different treatments

处理	逐步回归方程	决定系数	F 值	p 值
0.25 m	$T_r = -0.985 + 0.029T_a + 0.005R_H - 0.001I_n$	0.821	9.157	0.011 7
0.5 m	$T_r = -0.898 + 0.027T_a + 0.006R_H - 0.003I_n$	0.801	8.017	0.016 1
0.7 m	$T_r = -0.704 + 0.015T_a + 0.013R_H - 0.001I_n$	0.878	14.298	0.003 9
0.9 m	$T_r = 0.016 + 0.012T_a - 0.004R_H + 0.001I_n$	0.850	11.372	0.006 9
CKi	$T_r = -3.372 + 0.068T_a + 0.032R_H$	0.800	13.862	0.003 7
CKo	$T_r = -10.130 + 0.211T_a + 0.079R_H + 0.000 2I_n$	0.556	2.506	0.155 9

注: T_r 为盆栽小白菜的蒸腾速率 (mm/h), T_a 为各处理小环境内每小时的平均温度 ($^{\circ}\text{C}$), R_H 为各处理小环境内每小时的平均空气相对湿度 (%), I_n 为各处理小环境内每小时的平均光照强度 (klx)。

2.6 不同处理小白菜生长状况及水分生产率

蔬菜通过光合作用合成碳水化合物并积累干物质, 干物质质量积累的多少直接反映在株高、叶片数等生长指标上^[24]。试验结束时, 测定不同深度沟内小白菜的生长指标, 如表 3 所示。

表 3 不同处理小白菜生长指标的对比

Tab. 3 Comparison of plant growth indices under different treatments

处理	株高/cm	叶片数/(片·株 ⁻¹)
0.25 m	14.02 ± 2.32 ^B	9.8 ± 2.49 ^A
0.5 m	20.48 ± 2.52 ^A	9.0 ± 1.23 ^{AB}
0.7 m	22.54 ± 2.01 ^A	10.0 ± 1.23 ^A
0.9 m	19.56 ± 2.52 ^A	10.2 ± 2.17 ^A
CKi	21.30 ± 2.64 ^A	9.2 ± 1.48 ^{AB}
CKo	12.56 ± 1.83 ^B	6.4 ± 0.55 ^B

注: 多重比较采用 Duncan 新复极差法, $p \leq 0.01$ 为差异极显著。下同。

株高是衡量植株生长旺盛与否的一项重要指标。从表 3 可以看出, 除深度为 0.25 m 的处理外, 沟内其他处理的植株生长均比较茂盛, 深度 0.7 m 内的株高最大, 0.9 m 处理最小。深度为 0.5 m、0.7 m 和 0.9 m 处理的株高与 CKi 无显著差异, 与 CKo 的差异达到极显著水平。叶片数的多少在一定程度上反映了植株的长势和群体光合能力。深度为 0.25 m、0.7 m 和 0.9 m 处理的叶片数差异较小, 均在 9.2 ~ 10.2 片/株之间, 与 CKi 的差异达显著水平, 与 CKo 的差异达到极显著水平。由于小白菜属于弱光照的绿叶蔬菜^[25], 光补偿点约为 1 000 ~ 1 500 lx, 而深度 0.9 m 的光照强度虽最小, 但仍能满足小白菜正常生长的最低光照强度要求。

表 4 为各处理盆栽小白菜的产量、蒸腾量及水分生产率。CKi 的产量最大, 深度为 0.5 m、0.7 m 和 0.9 m 的处理次之, 产量达到 CKi 的 86.6% 以上, CKo 处理产量最小, 仅为 CKi 的 19.8%。总蒸腾量表现为 CKi 最大, 其他处理间差异不显著。各处理水分生产率的大小表现为: 0.9 m > 0.7 m > 0.5 m > 0.25 m > CKi > CKo, 沟内各处理与对照 CKo 差异显著。由此可知, 沟深的不同导致封闭环境内盆栽小白菜的产量、总蒸腾量和水分生产率差异明显。

表 4 不同处理小白菜产量、总蒸腾量和水分生产率

Tab. 4 Yield, transpiration and water productivity of Chinese cabbage under different treatments

处理	产量/(g·株 ⁻¹)	总蒸腾量/mm	水分生产率/(kg·m ⁻³)
0.25 m	19.55 ± 0.64 ^C	73.64 ± 2.16 ^B	5.88 ± 0.06 ^B
0.5 m	33.53 ± 0.22 ^B	78.17 ± 2.22 ^B	9.50 ± 0.31 ^A
0.7 m	32.45 ± 7.84 ^B	67.88 ± 4.35 ^B	10.54 ± 1.93 ^A
0.9 m	32.43 ± 2.53 ^B	66.38 ± 3.12 ^B	10.80 ± 0.51 ^A
CKi	37.43 ± 1.65 ^A	145.24 ± 3.73 ^A	5.70 ± 0.56 ^B
CKo	7.40 ± 0.25 ^D	76.92 ± 2.16 ^B	2.13 ± 0.04 ^C

3 结论

(1) 由于地温对沟内温度的平衡作用, 使得深度为 0.7 m 和 0.9 m 处理在高温环境下, 植株生长点的温度较 CKi 有明显的降低, 最大温差大于 20 $^{\circ}\text{C}$; 光照强度随着沟深的增加而减小, 但小白菜属于弱光照作物, 0.9 m 处理的光照强度仍能满足光合作用的要求, 对植株的生长和产量影响较小; 各处理的空气相对湿度基本保持在 25% ~ 75% 之间, 适宜植株生长。同时, 建立了不同深度沟内蒸腾速率

与各环境因子的逐步回归方程,决定系数均在0.8以上,达到显著水平。

(2)除深度为0.25 m处理外,沟内其他处理的植株生长均比较茂盛,植株叶片数差异较小,深度0.7 m的株高最大。水分生产率的大小表现为0.9 m处理最高,0.7 m处理次之,且均与CK₀差异显著。从蔬菜生长状况来看,CK_i处理产量最高,深

度为0.5~0.9 m处理的产量差异较小,为CK_i的86.6%以上,但总蒸腾量仅为其1/2。

(3)综合以上各因素分析,高温季节深度0.7 m和0.9 m处理更适宜小白菜的生长。

(4)沟式栽培作为一种新的封闭温室降温方法和蔬菜栽培模式,经济有效地降低了植株冠层附近的温度。

参 考 文 献

- 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.
Zhang Min, Wang Guodong, Xue Xuzhang, et al. Research on cooling methods for closed greenhouse[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2011, 39(7): 129-134. (in Chinese)
- Lee W F. Cooling capacity assessment of semi-closed greenhouses[D]. Columbus, Ohio: Ohio State University, 2011, 42:55-76.
- 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.
Wang Jiqing, Zhang Bailiang. Application of some cooling measures for greenhouse cooling in summer[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(9): 257-260. (in Chinese)
- Speetjens S L, van der Walle T, Straten G van, et al. Watery, towards a closed greenhouse in semi-arid regions-experiment with a heat exchanger[C]//International Conference on Sustainable Greenhouse Systems-Greensys, 2004: 845-851.
- Bot G, van de Braak N, Challa H, et al. The solar greenhouse: state of the art in energy saving and sustainable energy supply[J]. Acta Horticulturae, 2005, 691(2): 501-508.
- Davies P A, Paton C. The seawater greenhouse in the United Arab Emirates: thermal modeling and evaluation of design options[J]. Desalination, 2005, 173(2): 103-111.
- 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.
- 晓夫.日本的植物工厂及其新技术[J].生态经济,2004(7):58-61.
- 李霞,解迎革,薛绪掌,等.温室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.
Li Xia, Xie Yingge, Xue Xuzhang, et al. Effects of cooling, dehumidification and transpiration water recycling of closed micro-environment in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 254-259. (in Chinese)
- 黄洁,金莉莉,李振杰,等.南疆沙漠腹地地温变化特征[J].干旱区资源与环境,2013,27(1):148-153.
Huang Jie, Jin Lili, Li Zhenjie, et al. Variation of soil temperature characteristics at Tazhong, Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(1): 148-153. (in Chinese)
- 杨爱,刘圣春.我国地源热泵的研究现状及展望[J].制冷与空调,2009,9(4):1-6.
Yang Ai, Liu Shengchun. Research situation and prospect of Chinese GSHP[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2009, 9(4): 1-6. (in Chinese)
- 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.
Zheng Rongjin, Zhuang Lin, Chi Qing, et al. Thermodynamic analysis of solar-assisted ground source heat pump system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 233-238. (in Chinese)
- 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.
Guo Jianwu, Jiang Dongcang, Xue Aili. Prevention and control of field planting with ditch, cooling and moisture retention on tomato yellow leaf curl virus disease[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2011, 15(5): 42-43. (in Chinese)
- 许迪,龚时宏,李益农,等.农作物水分生产率改善途径与方法研究综述[J].水利学报,2010,41(6):631-639.
Xu Di, Gong Shihong, Li Yinong, et al. Overview of recent study on improvement approaches and methods for crop water productivity[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(6): 631-639. (in Chinese)
- 郑捷,李光永,韩振中.中美主要农作物灌溉水分生产率分析[J].农业工程学报,2008,24(11):46-50.
Zheng Jie, Li Guangyong, Han Zhenzhong. Sino-US irrigation water use efficiencies of main crops[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(11): 46-50. (in Chinese)
- 丁小涛,金海军,张红梅,等.不同设施光照度日变化及透光率的研究[J].中国瓜菜,2011,24(1):1-4.
Ding Xiaotao, Jin Haijun, Zhang Hongmei, et al. Changes of illuminations and light transmissivities in different greenhouses[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2011, 24(1): 1-4. (in Chinese)
- 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.
Zhang Xinsheng, Chen Hu, Fu You. Effect of light and temperature on photosynthesis of peach in greenhouse[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2006, 10(2): 31-33. (in Chinese)
- 张立军,刘新.植物生理学[M].北京:科学出版社,2011.

- 19 吴擎龙. 田间蒸发条件下水热运移数值模拟[D]. 北京:清华大学,1993.
Wu Qinglong. Numerical simulation of field evapotranspiration under the condition of heat transfer[D]. Beijing: Tsinghua University, 1993. (in Chinese)
- 20 柯晓新,杨兴国,张旭东. 农田蒸发蒸腾测算的微小气象学方法[J]. 干旱地区农业研究,1995,13(1):31-40.
Ke Xiaoxin, Yang Xingguo, Zhang Xudong. Micro meteorological methods for measuring and estimating evapotranspiration in farmland[J]. Agricultural Research in Arid Areas, 1995, 13(1): 31-40. (in Chinese)
- 21 Yunusa I M A, Walkera R R, Lu P. Evapotranspiration components from energy balance, sapflow and microlysimetry techniques for an irrigated vineyard in inland Australia[J]. Agriculture and Forest Meteorology, 2004, 127(1-2): 93-107.
- 22 段崇香. 日光温室黄瓜有机基质合理基质配方及需肥特性的研究[D]. 泰安:山东农业大学,2002.
Duan Chongxiang. The studies on the rational substrate compositions and the characteristics of requiring fertilizer of cucumber in organic substrate culture on solar greenhouse[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2002. (in Chinese)
- 23 王文斌,高占峰. 影响蔬菜生长的气象因子分析[J]. 安徽农业科学,2012,40(35):17202-17203.
Wang Wenbin, Gao Zhanfeng. Meteorological factors affecting the growth of vegetables [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(35):17202-17203. (in Chinese)

Cooling Method and Vegetable Growth in Closed Greenhouses Based on Ditch Cultivation

Zhang Min¹ Zhang Fucang² Xue Xuzhang³ Li Xia¹ Wang Guodong¹

(1. College of Science, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education,
Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: Since the soil temperature in closed greenhouses is relatively constant and less influenced by external environment, the ditch cultivation method in closed greenhouses is adopted to conduct tests in this research. Moreover, water is supplied according to the transpiration to create suitable conditions for crops. The differences among the environmental factors of different ditches with various depth and their influences on transpiration rate, yield of Chinese cabbage as well as water productivity are researched. The results show that in high temperature condition the temperature values in 0.7 m and 0.9 m (the depth of the ditch) are reduced obviously compared with CKi (Check treatment in greenhouse), and the maximum temperature difference is larger than 20°C. The humidity is maintained between 25% and 75%, which is suitable for the growth of crops. The water productivity for each treatment are: 0.9 m > 0.7 m > 0.5 m > 0.25 m > CKi > CKo. In high temperature, ditches with the depths of 0.7 m and 0.9 m are more suitable for the growth of Chinese cabbage. Therefore, ditch cultivation method can solve the high temperature and high humidity problems of closed greenhouse. Meanwhile, it can improve the crop water productivity.

Key words: Closed greenhouse Planting with ditch Cooling Water productivity