

## 日光温室保温被保温性能影响因素的分析

刘晨霞<sup>1</sup>, 马承伟<sup>1\*</sup>, 王平智<sup>1</sup>, 赵淑梅<sup>1</sup>, 程杰宇<sup>1</sup>, 王明磊<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院 农业部设施农业工程重点实验室, 北京 100083;

2. 农业部农业机械试验鉴定总站, 北京 100122)

**摘 要:** 日光温室保温被保温性能受多种因素的影响。该文采用日光温室保温被传热理论模型, 针对影响保温被传热系数的主要因素进行了模拟分析。结果显示: 保温被的上表面红外辐射特性对其保温性能的影响更加显著; 当保温被的厚度为 40~50 mm 时, 普通隔热材料作为保温芯材, 均可满足设施园艺覆盖材料保温性能要求; 保温芯材在不考虑保温被冷风渗透的情况下, 当保温被的传热系数较大, 上表面发射率较小时, 保温被传热系数随室外风速的增大而增大; 当保温被的传热系数较小, 保温被上表面发射率较大, 保温被的传热系数随室外风速的增大而减小。在此基础上, 构建了能反映保温被传热系数与各影响因素间的关系的传热系数经验计算式。该文分析结果及成果为保温被的合理开发及应用提供了参考依据。

**关键词:** 温室; 保温; 保温材料; 传热系数; 日光温室; 保温被; 保温性能; 传热理论模型; 影响因素

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.20.026

中图分类号: S625; TU111.19

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-20-0186-08

刘晨霞, 马承伟, 王平智, 赵淑梅, 程杰宇, 王明磊. 日光温室保温被保温性能影响因素的分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 186—193. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.20.026 http://www.tcsae.org

Liu Chenxia, Ma Chengwei, Wang Pingzhi, Zhao Shumei, Cheng Jieyu, Wang Minglei. Analysis on affecting factors of heat preservation properties for thermal insulation covers[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(20): 186—193. (in Chinese with English abstract)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.20.026 http://www.tcsae.org

## 0 引言

日光温室的围护结构中, 前屋面是其在夜间散热的主要部分。因此, 夜间日光温室前屋面通常采用外覆盖保温被的方法减少热量损失。近 20 a 来, 已经研究开发了各种类型的保温被, 并得到大量的生产和应用<sup>[1-5]</sup>。针对保温被的保温性能展开了系列的理论及实验研究<sup>[6-15]</sup>。在保温被保温性能影响因素分析方面, 陈端生<sup>[6]</sup>在对外保温覆盖材料的保温性能研究中, 对单层薄膜覆盖及薄膜加外覆盖时保温被的传热系数  $K$  ( $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ) 与风速  $v$  ( $m/s$ ) 的关系进行回归分析, 得出传热系数  $K$  随风速  $v$  的增大而增大的关系, 且二者高度相关; 周长吉<sup>[7]</sup>对保温被的测试研究中指出铝箔在保温被中的实际保温效果并不明显, 周新群<sup>[13]</sup>在日光温室外保温蜂窝结构覆盖材料的研究中指出, 单面铝箔朝上的覆盖材料的传热系数要低于单面铝箔朝下的覆盖材料, 针对铝箔材料对保温被

保温性能的影响说法不同。前人在保温被的保温性能影响因素方面的研究, 为保温被的研究、开发和应用提供了很有参考价值的研究成果。但由于过去研究条件所限, 对各种因素影响保温被保温性的规律还不够全面和系统, 尤其是对实际使用中的设施进行的试验测试, 因现场条件不易控制和测试准确, 难于获得较为准确的结果。而通过理论计算分析方法对保温被保温性能影响因素的系统分析研究尤其为少。

保温被的保温性能的影响因素分为自身因素和外部因素两部分。自身因素包括: 保温被材料的自身热物理性质——上、下表面的发射率 $\varepsilon$ , 材料的厚度  $d$  ( $mm$ )、材料的导热系数 $\lambda$  ( $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ) 等; 外部因素包括: 室外天空辐射背景温度  $T_v$  ( $^\circ C$ )、室外的风速  $V_o$  ( $m/s$ )、室内及室外的气温等。本文将主要采用理论的方法对影响保温被辐射传热的表面发射率 (或反射率), 影响保温被导热传热的材料导热系数、材料厚度, 影响保温被外表面对流传热的室外风速等因素进行分析。

## 1 分析方法

日光温室保温覆盖材料的传热系数是反映各种传热形式作用的综合性参数, 是对保温覆盖材料保温性能进行评价的一个重要指标, 同时也是日光温室内部热环境分析及工程设计中的一个重要参数。在分析某一影响因子对保温被保温性能影响时, 应当排除其它因素对其传热的影响, 即将其它因素视为常量<sup>[16]</sup>。

本文将采用已有的保温被的传热理论模型<sup>[17]</sup>, 对保

收稿日期: 2015-05-06 修订日期: 2015-10-12

基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项 (201203002); 现代农业产业技术体系建设 (CARS-25-D-04); 高效设施农业标准化工程技术集成示范 (201130104-4)

作者简介: 刘晨霞, 女, 河北石家庄人, 博士生, 研究方向为设施园艺工程研究。北京 中国农业大学农业部设施农业工程重点实验室, 100083。

Email: liuchexia2521@126.com

\*通信作者: 马承伟, 男, 重庆人, 教授, 博士生导师, 从事设施园艺工程研究。北京 中国农业大学农业部设施农业工程重点实验室, 100083。

Email: macwbs@cau.edu.cn

中国农业工程学会高级会员: 马承伟 (E041100006S)

温被传热系数的上述影响因素进行分析。保温被传热理论模型，是以保温被的使用情况为基础，采用有效辐射等分析方法，考虑了天空冷辐射，对保温被的辐射传热进行分析，通过覆盖层辐射传热和对流传热的能量平衡，建立的能全面反映保温被传热各主要影响因素的传热系数的理论模型，采用对该模型的求解算法编制了计算程序<sup>[17]</sup>。可用于定量计算不同的材料及环境条件下，保温被的传热系数。

本文理论研究的部分结果将进行试验测试验证，根据《NY/T 1831-2009 温室覆盖材料保温性能测定方法》的规定，采用温室覆盖材料保温性能测试台<sup>[18-21]</sup>对保温被的传热系数进行测试。

2 保温被传热系数各影响因素分析

2.1 保温被表面的红外反射率对传热系数的影响

表面的辐射传热是保温被传热形式之一，保温被表

面材料的热辐射物理特性直接影响辐射换热量。在保温被表面采用反射率较高的材料（例如铝箔或镀铝膜等），可以减少保温被表面的辐射传热，从而提高其保温性。但保温被表面覆盖反射率较高的材料对其保温性的作用究竟有多大，不同反射率材料对保温性影响的差异，以及反射率较高的材料覆盖于上表面和下表面相比，何者保温效果更为显著，以往的研究还尚未得到明确和统一的结论<sup>[7,13,22]</sup>。以下采取保温被传热模型，针对上、下表面不同发射率时的情况，计算其传热系数，并对得到的结果进行分析。

用于模拟的保温被芯材为发泡聚乙烯，厚度  $d$  分别取 10、20、30 mm，其导热系数取为  $0.033 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ <sup>[23-24]</sup>，为能使覆盖材料的表面红外辐射方面特性对传热系数的影响得以完整体现，分别取覆盖材料上表面反射率 $\rho_u$ 及下表面反射率 $\rho_d$ 为：0.1，0.3，0.5，0.7，0.9。模拟计算结果见表 1。

表 1 不同表面反射率下保温被传热系数计算值

Table 1 Calculated values of heat transfer coefficient of thick cover in different reflectivity

上表面反射率 $\rho_u$ Up-surface reflectivity	下表面反射率 $\rho_d$ Under-surface reflectivity	传热系数 $K$ Heat transfer coefficient/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$			上表面反射率相同，下表面反射率从 0.1 变化为 0.9 时，传热系数相对减小幅度 Range of heat transfer coefficient relative reduction with same up-surface reflectivity when under-surface reflectivities change from 0.1 to 0.9.
		$d=30 \text{ mm}$	$d=20 \text{ mm}$	$d=10 \text{ mm}$	
0.1	0.9	0.936	1.300	2.141	1.29%~4.43%
	0.7	0.940	1.309	2.170	
	0.5	0.943	1.317	2.196	
	0.3	0.946	1.325	2.219	
	0.1	0.948	1.331	2.240	
0.3	0.9	0.917	1.273	2.094	1.25%~4.41%
	0.7	0.921	1.282	2.122	
	0.5	0.924	1.290	2.147	
	0.3	0.927	1.297	2.170	
	0.1	0.929	1.303	2.190	
0.5	0.9	0.897	1.244	2.043	1.21%~4.38%
	0.7	0.901	1.253	2.071	
	0.5	0.903	1.261	2.095	
	0.3	0.906	1.267	2.117	
	0.1	0.908	1.273	2.137	
0.7	0.9	0.876	1.214	1.990	1.17%~4.35%
	0.7	0.879	1.222	2.016	
	0.5	0.882	1.229	2.040	
	0.3	0.884	1.236	2.061	
	0.1	0.886	1.241	2.080	
0.9	0.9	0.853	1.181	1.932	1.13%~4.32%
	0.7	0.856	1.189	1.958	
	0.5	0.858	1.196	1.981	
	0.3	0.860	1.202	2.001	
	0.1	0.862	1.207	2.019	
上表面反射率从 0.1 变化为 0.9 传热系数相对减小幅度 Range of heat transfer coefficient relative reduction with various upper surface reflectivity when up-surface reflectivities change from 0.1 to 0.9	0.9	8.92%	9.16%	9.75%	8.92%~9.86%
	0.7	8.96%	9.20%	9.78%	
	0.5	8.99%	9.23%	9.80%	
	0.3	9.03%	9.27%	9.83%	
	0.1	9.07%	9.30%	9.86%	

注： $d$  为保温被厚度。  
Note:  $d$  is the thickness of thick cover.

表 1 的计算结果显示,当保温被的上表面反射率取值(0.1~0.9)一定,下表面反射率从 0.1 增大到 0.9,保温被的传热系数相对减小幅度为 1.13%~4.43%;当保温被下表面反射率取值(0.1~0.9)一定,上表面反射率从 0.1 增大到 0.9,保温被的传热系数的相对减小幅度为 8.92%~9.86%。由此可见,上表面材料的反射率改变的作用大于下表面覆盖材料反射率改变的作用,即上表面覆盖高反射性材料增强覆盖保温性的作用大于下表面覆盖反射率高的材料。当保温被材料传热系数较大时,随上、下表面反射率由 0.1 增大到 0.9,传热系数的相对减小幅度较大,这种变化趋势尤其对于上表面反射率变化

更为明显。即当保温被的导热热阻较小、保温性较差时,在保温被的上表面应用高反射材料,对保温被保温性提高的作用较大。

以上结果表明,在保温被的表面采用反射率较高的材料,覆盖在上表面的作用比覆盖在下表面,对提高保温被的保温性的作用更大。而如果保温被本身的保温性较差时,反射率较高的材料覆盖在下表面也有一定的提高保温性的作用。

对以上理论分析结果采用试验测试的方法进行了验证,测试结果见表 2。

表 2 保温被传热系数理论计算值的验证

Table 2 Verification on theoretical calculating value of thick cover transfer coefficient

保温被结构组成 Thermal insulation structure	上表面 反射率 $\rho_a$ Up-surface reflectivity	下表面 反射率 $\rho_d$ Under-surface reflectivity	测定值 Measurement values		计算值 Calculated values	
			传热系数 Heat transfer coefficient/( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ )	相对减小幅度 Range of reduction/%	传热系数 Heat transfer coefficient/ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ )	相对减小幅度 Range of reduction/%
编织布、珍珠棉、镀铝编织布 PE fabric, PE foam, Aluminium coated fabric	0.3	0.7	1.064	0	1.056	0
镀铝编织布、珍珠棉、编织布 Aluminium coated fabric, PE foam, PE fabric	0.7	0.3	1.005	5.55	0.985	6.72
镀铝编织布、珍珠棉、镀铝编织布 Aluminium coated fabric, PE foam, Aluminium coated fabric	0.7	0.7	0.994	6.58	0.972	7.95

注:①表 2 中保温被材料放置为(由左到右)冷侧到热侧;②传热系数的相对减小幅度是以结构组成为:编织布、珍珠棉、镀铝编织布的保温被的传热系数为参考。

Note:① In table 2 the order of thermal insulation materials (from left to right) is from cold side to hot side;② The range of relative reduction of heat transfer coefficient is based on the thermal insulation thick cover coefficient, which structural components are PE fabric, PE foam, Aluminium coated fabric.

从表 2 可看出传热系数的模拟计算数值比试验测定值稍小,二者最多相差不到 3%。但从传热系数随保温被上、下表面反射率变化的趋势来讲,实测结果与理论分析是一致的,二者在相同的外表面反射率变化下,传热系数相对减小的幅度最大相差不到 2.0%。

高反射率的材料覆于保温被的上表面,其保温性能优于覆于下表面。可从以下 3 点分析:1)保温被下表面与室内环境之间,还隔有一层塑料薄膜(温室原有的固定覆盖层),因此保温被下表面并未与室内环境直接进行辐射传热。保温被之下的薄膜对红外辐射的吸收性减弱了下表面材料的反射作用。如果保温被下表面与室内环境之间没有固定薄膜,则采用同样的方法分析,在保温被上表面反射率一定,下表面发射率从 0.1 变化到 0.9 时,传热系数的相对减小幅度为 1.99%~8.54%,比隔有固定覆盖的薄膜时传热系数的相对减小幅度大。但这种减小的幅度仍低于上表面覆盖高反射性材料时的减小幅度;2)保温被通过上表面进行辐射传热的温差较大,一般大于 20℃,而下表面进行辐射传热的温差较小,小于 10℃<sup>[22]</sup>,因此上表面反射率的变化对辐射传热的作用更显著;3)由于温室为上凸形状的原因(详见参考文献[17]),上表面对天空的形状系数大于下表面对室内地面与植物的形状系数,这也导致上表面与天空间的辐射传热大于下表面对地面和植物间的辐射传热,上表面反射率的变化作用更大。

## 2.2 保温被材料的厚度、导热系数对传热系数的影响

保温被具有较大的厚度,是其区别于其他的温室保

温薄层覆盖的一个方面,保温被采用较大的厚度将有利于实现较高的保温性,实际使用中的保温被厚度在 1.5~5 cm 范围内。本文分析选取保温被的厚度  $d$  为 30、40、50 mm 时,传热系数的变化情况。

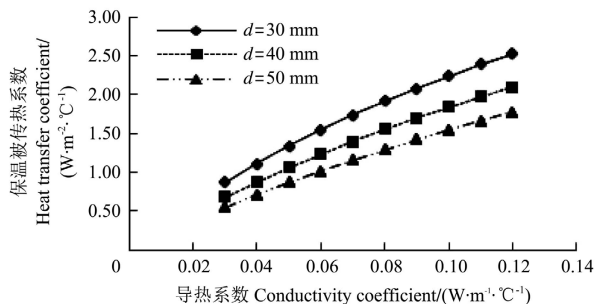
材料的导热系数是其固有的热物理性质,它表示物质导热能力的大小。工程上常用的保温材料大多呈纤维状或多孔结构,它们都不是连续体,其热量的传递依靠固体骨架和内部介质的导热、对流传热和辐射传热的综合作用。然而骨架间的空隙和空腔内含有热导率较小的介质,这些介质在保温材料中很少流动或不流动;骨架的存在削弱了辐射传热。因而,保温材料中实际的传热过程是较为复杂的,为方便起见,将保温材料视为一均质材料按相同传热条件下计算得出的均质材料的热导率称为保温材料的表观热导率。普通隔热材料的表观热导率 0.04~0.12 W/(m·℃)<sup>[25]</sup>。

目前使用的保温被材料主要有:发泡聚乙烯、针刺毡、再生棉、喷胶棉等。其中发泡聚乙烯的导热系数为 0.033 W/(m·℃)<sup>[16]</sup>,再生棉、喷胶棉的导热系数为 0.11~0.13 W/(m·℃)。因此,以下分析中取材料导热系数  $\lambda$  值为:0.03~0.12 W/(m·℃),以 0.01 W/(m·℃)作为步长。把以上数据代入模型计算程序,计算相应的传热系数。运用 excel 对传热系数与导热系数进行拟合分析。拟合趋势见图 1、图 2。

由图 1 可看出,保温被传热系数与材料的导热系数近似成正比关系。当保温被的厚度分别取 30、40、50 mm 定值时,材料导热系数由 0.03 W/(m·℃)增大到

0.12 W/(m·°C), 保温被的传热系数增大幅度分别为 68.94%、67.74%、65.63%, 即保温被传热系数随导热系数的增大而增大, 且保温被的厚度越小, 导热系数的变化对传热系数的影响越大; 由图 2 可看出, 保温被传热系数与厚度近似成反比关系。当保温被芯材的导热系数分别取 0.12、0.09、0.06、0.03 W/(m·°C), 厚度从 20 mm 增大到 50 mm, 其传热系数减小幅度分别为 45.60%、48.37%、51.58%、68.20%, 即随保温材料导热系数的降低, 保温被传热系数减小幅度逐渐增大。根据有关文献的要求, 保温被的传热系数不应高于 2.0 W/(m·°C)<sup>[26]</sup>, 当保温被的厚度为 40、50 mm 时, 普通隔热材料基本都可满足要求; 而当保温被厚度为 30 mm 时, 经计算保温芯材的导热系数应小于 0.08 W/(m·°C)。

在保温被的实际生产应用中, 因考虑经济性、保温被的卷放及温室荷载问题, 保温被的厚度不能无限增大。应根据温室保温要求及其它条件, 保温被应选择合适的材料、合理厚度。

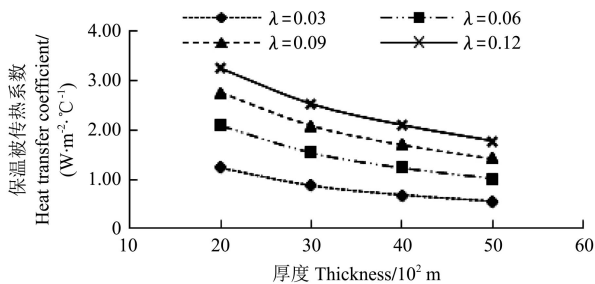


注:  $d$  为保温被厚度。

Note:  $d$  is the thickness of thick cover.

图 1 保温被传热系数与导热系数的关系

Fig.1 Relationship between heat transfer coefficient of thick cover and conductivity coefficient



注:  $\lambda$  为保温被材料导热系数。

Note:  $\lambda$  is the heat transfer coefficient of thick cover.

图 2 保温被传热系数与厚度的关系

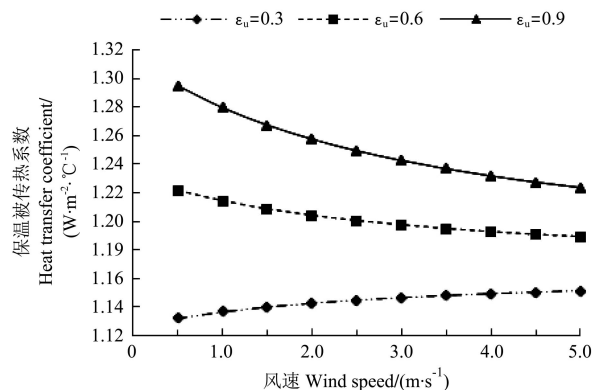
Fig.2 Relationship between heat transfer coefficient of thick cover and its thickness

### 2.3 室外风速变化对保温被传热系数的影响

对流换热是保温被传热形式之一。保温被的对流换热的主要发生在室外空气与保温被上外表面、以及室内空气与保温被下外表面。室外风速将影响室外空气与保温被上外表面的对流换热。

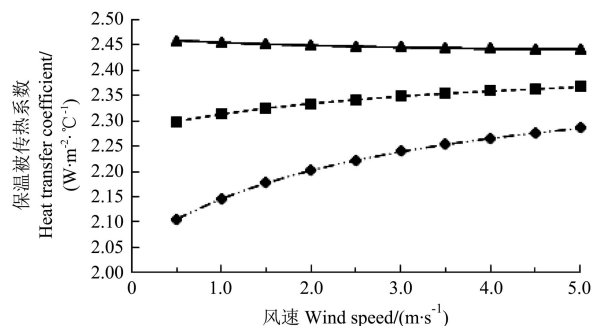
理论模拟的条件参数具体取值为: 保温芯材的导热系数取 0.03 W/(m·°C), 厚度分别取 8、20 mm, 下表面的发射率固定为 0.9, 室外风速的取值为: 0.5~5.0 m/s, 步长为 0.5 m/s。将不同的风速及其它参数代入理论模型计

算程序中, 计算出相应的传热系数。运用 excel 对不同厚度及上表面发射率条件下的传热系数与室外风速变化进行拟合分析。拟合趋势图见图 3。



a. 保温被厚度 20 mm

a. Thickness of thermal cover is 20 mm



b. 保温被厚度为 8 mm.

b. Thickness of thermal cover is 8 mm

注:  $\epsilon_u$  为上表面发射率;  $\lambda$  为保温被材料导热系数。

Note:  $\epsilon_u$  is the up-surface reflectivity;  $\lambda$  is the heat transfer coefficient of thick cover.

图 3 保温被传热系数与风速的关系

Fig.3 Relationship between heat transfer coefficient of thick covering and wind speed

图 3a 厚度为 20 mm 的保温被, 在不同的上表面发射率下, 随风速的变化曲线。下表面发射率固定为 0.9, 当上表面发射率为 0.9、0.6 时, 保温被传热系数随风速的增大而减小, 且减小速率随风速增大减小幅度变缓; 当上表面发射率为 0.3 时, 保温被传热系数随风速的增大而增大, 增大速率逐渐降低。

由图 3b 厚度为 8 mm 的保温被在不同的上表面发射率下, 随风速的变化曲线。下表面的发射率为 0.9, 当上表面发射率为 0.9 时, 保温被的传热系数随风速的增大而降低; 当上表面发射率为 0.3、0.6 时, 保温被的传热系数随风速的增大而增大, 且上表面发射率为 0.3 比 0.6 的传热系数增大速率大。

图 3 显示保温被传热系数随风速的增大, 其变化的速率逐渐变缓。

以上分析可知, 当上表面发射率较高, 传热系数较小时, 传热系数随风速的增大而减小; 当上表面发射率较低, 传热系数较大时, 传热系数随着风速的增大而增大。其原因是: 上表面发射率较高时, 上表面辐射传热量较大, 而当保温被的导热热阻较大时, 保温被通过导热从下表面到上表面的热量较小, 此时, 上表面容易出

现温度低于空气温度的情况, 因而风速越大, 上表面从空气中获得的热量越多, 保温被的传热系数就会随着风速的增大而减小; 当上表面的发射率较低, 保温被的导热热阻较小时, 上表面的辐射传热量较小, 而保温被导热热量就较大, 使得保温被的上表面的温度较高, 大于室外空气的温度, 这时室外风速越大, 上表面传出的热量就越多, 即保温被的传热系数随着风速的增大而增大。

以上的分析中, 无论是理论的模拟计算还是室内的试验测试过程中, 均未考虑冷风渗透所造成的热量损失。但保温被在实际的应用中, 保温被之间的搭接往往存在缝隙, 使得一部分热量散失, 因此, 保温被在应用中, 如果考虑冷风渗透的原因, 则保温被的保温性能往往随着风速的增大而降低, 即保温被的传热系数随风速的增大而增大。因此, 应尽量使相邻保温被搭接好, 做到少透风甚至不透风。

### 3 传热系数的经验计算公式

上述分析中, 采用日光温室保温被传热理论模型的计算程序, 对影响保温被保温性能的因素与传热系数值的关系进行了分析。由于理论模型及其求解算法较为复杂, 不便于一般研究时对保温被的传热进行分析研究, 因此, 如能找到保温被的传热与其各方面影响因素的较为简明、方便计算分析的数值关系, 对于保温被保温性的研究将具有很大意义。为此, 对保温被传热系数与各影响因素之间的关系进行观察、分析, 可将传热系数表

达为以下形式:

$$K = \varepsilon_u^{C_u} \cdot \varepsilon_d^{C_d} \cdot C \cdot K_0^{C_k} \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon_u$  为保温被上表面的发射率;  $\varepsilon_d$  为保温被下表面的发射率;  $C_u$ 、 $C_d$ 、 $C_k$ 、 $C$  均为待定的常数;  $K_0$  为只考虑保温被的导热和对流时的传热系数, 表达式如下<sup>[16]</sup>:

$$K_0 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_d} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_u}} \quad (2)$$

$$\alpha_d = 2.21\Delta T^{0.33} \quad (3)$$

$$\alpha_u = 7.2 + 3.84v_0 \quad (4)$$

式中:  $\alpha_d$  为保温被下表面对流换热系数<sup>[27]</sup>, 取  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;  $\alpha_u$  为保温被外表面的对流换热系数<sup>[28]</sup>,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;  $\delta_i$  为保温被第  $i$  层材料的厚度,  $m$ ;  $\lambda_i$  为保温被  $i$  层材料的导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $\Delta T$  为温室内气温与保温被下表面温度差值, 本文取  $5^\circ C$ ;  $v_0$  为室外风速, 本文取  $4.0 m/s$ 。

以下采用理论模型的传热系数计算程序进行数值试验, 对结果数据进行回归分析的方法, 确定式 (1) 中的参数  $C$ 、 $C_u$ 、 $C_d$ 、 $C_k$ 。

由于对式 (1) 的回归分析, 为多元非线性回归问题, 需要对其进行处理, 使其成为多元线性方程, 进而对其进行回归。对 (1) 式二端取对数, 则有:

$$\ln K = C_u \ln \varepsilon_u + C_d \ln \varepsilon_d + \ln C + C_k \ln K_0 \quad (5)$$

利用 Spass 软件对上式中已知参数与未知参数  $C_u$ 、 $C_d$ 、 $C$  进行多元线性回归分析, 回归决定系数  $R^2=0.998$ , 其它系数见表 3。

表 3 回归系数  
Table 3 Regression coefficients

模型 Model	非标准化系数 Unstandardized coefficients				偏相关系数 Partial correlation coefficients
	回归系数及截距 Regression coefficients and intercept	标准误差 Standard errors	$t$	显著性 Sig.	
常量 Constant	0.180	0.002	78.195	<0.001	0.937
$\ln \varepsilon_u$	0.043	0.001	29.418	<0.001	0.576
$\ln \varepsilon_d$	0.011	0.001	7.756	<0.001	0.999
$\ln K_0$	1.221	0.005	260.882	<0.001	0.937

注:  $\varepsilon_u$  为保温被上表面的发射率;  $\varepsilon_d$  为保温被下表面的发射率;  $K_0$  为只考虑保温被的导热和对流时的传热系数。

Note:  $\varepsilon_u$  is the up-surface reflectivity;  $\varepsilon_d$  is the down-surface reflectivity;  $K_0$  heat transfer coefficient of thick cover including conduction and convection.

由表 1 可知:  $C_u=0.043$ ;  $C_d=0.011$ ;  $C_k=1.221$ ;  $C=e^{0.180}=1.1972$ ;

$\ln \varepsilon_u$  的偏相关系数=0.576;

$\ln \varepsilon_d$  的偏相关系数=0.999;

$\ln K_0$  的偏相关系数=0.937;

经计算得传热系数  $K$  的偏差平方和  $Q=0.000582$ ; 平均标准偏差  $\delta=0.004021$ ; 复相关系数  $R=0.99981$ ; 回归平方和  $S_T=1.5539$ ; 最大误差百分数  $\leq 3.5\%$ 。

把系数代入式 (4), 得传热系数的计算式为:

$$K = 1.1972 \cdot \varepsilon_u^{0.043} \cdot \varepsilon_d^{0.011} \cdot K_0^{1.221} \quad (6)$$

该传热系数的经验公式与日光温室保温被传热理论模型相比较, 计算简单、方便, 且能直观的反映出保温被传热系数与其各种影响因素间的关系。该经验公式是

基于保温被传热理论模型得出的, 准确度高, 为保温被的研制开发、保温性能的计算及温室热环境的分析提供了简便的计算方法。

### 4 采用经验计算公式对保温被传热系数影响因素分析

#### 4.1 采用计算公式对保温被上、下表面发射率的分析

利用保温被传热系数的经验公式 (6), 可以方便地进行保温被传热系数与其各种影响因素间关系的分析。以保温被上、下表面发射率对传热系数的影响为例:

当保温被的  $K_0$  及其下表面发射率  $\varepsilon_d$  确定时, 令:

$$K_d = 1.1972 \cdot \varepsilon_d^{0.011} \cdot K_0^{1.221} \quad (7)$$

则式 (6) 可记为:

$$K = K_d \cdot \varepsilon_u^{0.043} \quad (8)$$

则保温被传热系数随上表面发射率增加 $\Delta\varepsilon_u$ , 其增加幅度 $\Delta K$ 为:

$$\Delta K = \frac{\partial K}{\partial \varepsilon_u} \cdot \Delta \varepsilon_u = 0.043 \times K_d \cdot \varepsilon_u^{-0.957} \cdot \Delta \varepsilon_u \quad (9)$$

则其传热系数随上表面发射率增加相对增加百分数为:

$$100\% \times \frac{\Delta K}{K} \approx 100\% \times \frac{\partial K}{\partial \varepsilon_u} \cdot \frac{\Delta \varepsilon_u}{K} = 4.3\% \times \frac{\Delta \varepsilon_u}{\varepsilon_u} \quad (10)$$

同样, 当保温被的  $K_0$  及其上表面发射率 $\varepsilon_u$  确定时, 令:

$$K_u = 1.1972 \cdot \varepsilon_u^{0.043} \cdot K_0^{1.221} \quad (11)$$

则保温被传热系数随下表面发射率增加 $\Delta\varepsilon_d$ , 其增加幅度 $\Delta K$ 为:

$$\Delta K = \frac{\partial K}{\partial \varepsilon_d} \cdot \Delta \varepsilon_d = 0.011 \times K_u \cdot \varepsilon_d^{-0.989} \cdot \Delta \varepsilon_d \quad (12)$$

则式(6)可记为:

$$K = K_u \cdot \varepsilon_d^{0.011} \quad (13)$$

则其传热系数随下表面发射率增加相对增加百分数为:

$$100\% \times \frac{\Delta K}{K} \approx 100\% \times \frac{\partial K}{\partial \varepsilon_d} \cdot \frac{\Delta \varepsilon_d}{K} = 1.1\% \times \frac{\Delta \varepsilon_d}{\varepsilon_d} \quad (14)$$

由式(8)、(13)可知, 保温被传热系数随表面发射率的增大而增大, 从式(10)、(14)可看出, 保温被上表面发射率对传热系数的影响大于下表面发射率对传热系数影响。

## 5 结论及讨论

本文采用已经建立的保温被传热模型, 对保温被传热系数的主要影响因素进行了分析。在此基础上, 构建了传热系数的经验计算公式。该计算式简单明了的反映了保温被传热系数与各影响因素间的关系。并得出以下结论:

1) 保温被的上表面红外辐射特性对其保温性能的影响更加显著。当保温被的上表面反射率取值(0.1~0.9)一定, 下表面反射率从0.1增大到0.9, 保温被的传热系数相减幅度为1.13%~4.43%; 当保温被下表面反射率取值(0.1~0.9)一定, 上表面反射率由0.1增大到0.9, 保温被的传热系数的相对减幅度为8.92%~9.86%。

2) 保温被的厚度越小, 保温被芯材的导热系数变化对其保温性能影响就越大; 当保温被的厚度为40、50 mm时, 普通隔热材料均可使保温被满足设施园艺覆盖材料保温性能的要求。

3) 在不考虑保温被由于搭接缝造成的热量散失时, 当保温被的传热系数较大, 上表面发射率较小时, 保温被传热系数随室外风速的增大而增大; 当保温被的传热系数较小, 保温被上表面发射率较大, 保温被的传热系数随室外风速的增大而减小。

温室保温被的保温性能受多种因素的影响, 本文中

只分析了表面红外辐射特性参数、材料导热系数、保温被厚度、室外风速等主要因素对传热系数的影响。并未考虑保温被含湿量等其它因素对其传热系数的影响, 且在分析风速对传热系数的影响时, 并未考虑保温被搭接缝的冷风渗透问题, 更完善的分析有待深入研究。

## [参 考 文 献]

- [1] 徐刚毅, 董天峰. 日光温室保温被发展近况[J]. 蔬菜, 1998(5): 14.
- [2] 张放军, 陈海珍. 日光温室保温被的发展现状分析与进展[J]. 纺织导报, 2011(1): 73—76.  
Zhang Fangjun, Chen Haizhen. Development status and tendency of heat insulating cover for greenhouse[J]. China Textile Leader, 2011(1): 73—76. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘璿瑛, 丁为民, 张剑锋. 日光温室保温帘揭盖时间的确定[J]. 农业工程学报, 2004, 20(04): 230—233.  
Liu Yingying, Ding Weimin, Zhang Jianfeng. Time for uncovering heat preservation curtain for sunlight greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(4): 230—233. (in Chinese with English abstract)
- [4] 钟岩, 罗新兰, 李炳海, 等. 沈阳地区日光温室揭盖时间的模拟[J]. 江苏农业科学, 2009 (3): 403—405.
- [5] 佟国红, Christopher D M., 李天来, 等. 日光温室保温被卷放位置对温度环境的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 253—258.  
Tong Guohong, Christopher D M, Li Tianlai, et al. Influence of thermal blanket position on solar greenhouse temperature distributions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(10): 253—258. (in Chinese with English abstract).
- [6] 陈端生, 邱建军, 王刚, 等. 几种日光温室外保温覆盖材料的保温性能[J]. 农业工程学报, 1996, 12(增刊): 108—115.  
Chen Duansheng, Qiu Jianjun, Wang Gang, et al. Study on heat preservative properties of several thermal insulated covering materials for solar plastic greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1996, 12(supplement): 108 — 115. (in Chinese with English abstract)
- [7] 周长吉, 周新群, 桂金光. 几种日光温室复合保温被保温性能分析[J]. 农业工程学报, 1999, 15(2): 168—171.  
Zhou Changji, Zhou Xinqun, Gui Jinguang. Performance analysis on several kinds of insulation pads for solar plastic Greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1999, 15(2): 168—171. (in Chinese with English abstract)
- [8] 陈端生, 郑海山, 刘步洲. 日光温室气象环境综合研究(一)——墙体、覆盖物热效应研究初报[J]. 农业工程学报, 1990, 6(2): 77—81.



- Chen Duansheng, Zhang Haishan, Liu Buzhou. Comprehensive study on the meteorological environment of the sunlight greenhouse I: Preliminary study on the thermal effect of the wall body and covering materials[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1990, 6(2): 77—81. (in Chinese with English abstract)
- [9] 齐刚, 董仁杰, 刘道启. 一种温室覆盖新型材料蜂窝塑料膜[J]. 农业工程学报, 1992, 12(1): 52—56.
- Qi Gang, Dong Renjie, Liu Daoqi. A new kind of greenhouse covering material: honeycomb plastic film[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1992, 12(1): 52—56. (in Chinese with English abstract)
- [10] 黄学群, 谢世平. 新型高效保温被的效果及应用前景[J]. 天津农业科学, 2004, 10(3): 25—27.
- Huang Xuequn, Xie Shiping. Effect and application perspective of new-type high-efficient heat preservation quilt[J]. Tianjin Agricultural Science, 2004, 10(3): 25—27. (in Chinese with English abstract)
- [11] 李化龙, 刘新生, 范彩兰, 等. 日光温室反辐射式保温被的开发与特性研究[J]. 陕西气象, 2001 (1): 24—26.
- [12] 邱仲华, 宋明军, 康永动, 等. 一种复合保温覆盖材料研制和应用试验初报[J]. 农业工程学报, 1995, 11(4): 117—120.
- Qiu Zhonghua, Song Mingjun, Kang Yongdong, et al. The primary report on research and application of a compound thermal insulated material for covering[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1995, 11(4): 117—120. (in Chinese with English abstract)
- [13] 周新群, 董仁杰, 张淑敏, 等. 日光温室外保温蜂窝结构覆盖材料的研究[J]. 农业工程学报, 1998, 14(4): 159—163.
- Zhou Xinqun, Dong Renjie, Zhang Shumin, et al. Study on thermal insulation covering materials of honeycomb plastic sheet[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1998, 14(4): 159—163. (in Chinese with English abstract)
- [14] 徐刚毅, 周长吉. 日光温室PE发泡自防水保温被的研制与性能测试[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 128—131.
- Xu Gangyi, Zhou Changji. Research and development and performance test of waterproof puffed PE heat preservation quilt for sunlight greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(1): 128—131. (in Chinese with English abstract)
- [15] 乔正卫, 邹志荣, 杨双晓. 一种日光温室保温被的保温性能研究[J]. 农机化研究, 2008(6): 131—133.
- Qiao Zhengwei, Zou Zhirong, Yang Shuangxiao. Heat preservation test of one kind of thermal quilt for solar greenhouse[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008(6): 131—133. (in Chinese with English abstract)
- [16] 马承伟, 苗香雯. 农业生物环境工程[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [17] 刘晨霞, 马承伟, 王平智, 等. 日光温室保温被传热的理论解析及验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 170—176.
- Liu Chenxia, Ma Chengwei, Wang Pingzhi, et al. Numerical simulation and experimental verification of heat transfer through thick covering materials of the solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(2): 170—176. (in Chinese with English abstract)
- [18] NY/T1831-2009, 温室覆盖材料保温性能测试方[S].
- [19] 覃密道. 覆盖材料传热系数测试技术和设备的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- Qin Midao. Research on the Test Apparatus and Technology for Measuring the Thermal Transmittance of Greenhouse Covering Materials[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [20] 张俊芳. 温室覆盖层传热及传热系数的理论解析与验证[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- Zhang Junfang. Theoretical Analysis and Validation on Heat Transfer of Covering Layer and Heat Transfer Coefficients[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [21] 张俊芳, 马承伟, 覃密道, 等. 温室覆盖材料传热系数测试台的研究开发[J]. 农业工程学报, 2005, 21(11): 141—145.
- Zhang Junfang, Ma Chengwei, Qin Midao, et al. Research and development of the test apparatus for measure the overall heat transfer coefficient of greenhouse cover materials[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(11): 141—145. (in Chinese with English abstract)
- [22] 王明磊. 日光温室厚型保温覆盖材料保温性能研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2008.
- Wang Minglei. Research on the Heat Preserve Capability of the Solar Greenhouse Thick Covering Materials[D]. Beijing: China Agricultural University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [23] 章熙敏, 任泽霏, 梅飞鸣. 传热学(第五版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [24] 中国新型建筑材料公司. 新型建筑材料实用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.
- [25] GB4272-92, 设备及管道保温技术通则[S].
- [26] 陈端生. 设施园艺生产对覆盖材料性能的要求[J]. 农村实用工程技术(温室园艺), 2003(1): 25—26.
- [27] Garzoli K V, Blackwell J. An analysis of the nocturnal heat-loss from a double skin plastic. Journal of Agricultural Engineering Research, 1987, 36(2): 75—86.
- [28] Papadakis G, Frangoudakis A, Kyritsis S. Mixed, forced and free convection heat transfer at the greenhouse cover. Journal of Agricultural Engineering Research, 1992, 51(1—4): 191—205.

## Analysis on affecting factors of heat preservation properties for thermal insulation covers

Liu Chenxia<sup>1</sup>, Ma Chengwei<sup>1\*</sup>, Wang Pingzhi<sup>1</sup>, Zhao Shumei<sup>1</sup>, Cheng Jieyu<sup>1</sup>, Wang Minglei<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Agricultural Engineering in Structure and Environment, Ministry of Agriculture, College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. China Agricultural Machinery Testing Center, Ministry of Agricultural, Beijing 100122, China)

**Abstract:** The thermal insulation properties of solar greenhouse thick cover are affected by many factors, due to the complexity of heat transfer process which include conduction, convection and radiation. There have been some studies on the effects of the outdoor wind speed and infrared characteristic parameters of cover surface on the thermal insulation performance of thick cover. However, it is difficult to obtain accurate results due to the site conditions are not easy to control, and there are limited systematic studies on impact factors, which include heat preservation performance of greenhouse thick cover, using heat transfer theory. To master the effects of main influence factors on heat transfer coefficient of thick cover, we analyzed the relationship between surface emissivity of thermal insulation covers, thickness of thick cover, coefficients of insulation materials, wind speed of outside and the heat transfer coefficient of thermal insulation covers using heat transfer theoretical model on thermal thick cover. While the relationship between one factor and heat preservation performance of thick cover was being analyzed, other factors should be considered as constants to eliminate the impact of these factors. Thus the variation trend of relationship between single factor and heat transfer coefficient  $K$  can be gained. The results showed that the effect of up surface emissivity of thermal insulation covers on  $K$  value was more than 8.9%, and the effect of down surface emissivity of thermal insulation covers on  $K$  value was less than 4.5%, when there was fixed film under the thermal thick cover. When there was without fixed film, the effect about down surface emissivity of thermal insulation covers on  $K$  value would increase, but it was still lower than that of up surface emissivity on heat transfer coefficient. The increase in thickness and the decrease in conductivity coefficient of thermal thick cover would increase the heat transfer resistance substantially. So the  $K$  value would be decreased with thickness increasing or heat conductivity coefficient of thick cover materials reducing. It also showed that all the thermal insulation materials could meet the heat preservation performance requirements of horticultural cover, when the thickness was between 40 mm and 50 mm, based on the analysis of the relationship between  $K$  and thickness of thermal thick cover, conductivity coefficient of thermal insulation materials.  $K$  value of thermal thick cover was decreased with wind speed increasing (neglecting the heat loss of thick cover overlap joints) when emissivity of the upper surface was high and the heat transfer coefficient was low;  $K$  value of thermal thick cover was increased with wind speed increasing when emissivity of the upper surface was low and the heat transfer coefficient was high. An empirical formula on heat transfer coefficient was promoted based on the analysis of the relationship between influence factors and heat transfer coefficient. And the parameters in the formula were obtained by regression method. The empirical formula about  $K$  provides theoretical foundation for development and application of thermal thick cover.

**Key words:** greenhouse; thermal insulation; thermal insulation materials; heat transfer coefficient; solar greenhouse; thermal insulation covers; thermal insulation properties; heat transfer theoretical model; influence factors