doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.047

主动式温室地暖系统温控效果仿真与试验

王 新 张圆圆 陈 度 曾 浩 许 苗 王书茂 (中国农业大学工学院,北京 100083)

摘要:针对严寒天气影响温室内作物生长的问题,提出了一种主动式温室地暖系统,并基于热平衡理论,首先对地 暖系统的热量传递过程进行了研究,分别建立了温控系统径向、轴向传热数学分析模型;再利用有限元分析软件进 行了二维稳态温度分布状态的数值模拟,研究结果表明,若将距地面 20 cm 处土地温度大于 15℃ 作为地暖系统的 有效作业范围(简称 Q_f),地暖系统的开启温度应不低于 28℃,且系统入风口温度每增加 2℃,其轴向有效作业辐射 范围可扩大 2.4~2.8 m;通过与昌平区马池口温室大棚实地试验的数据对比,地暖系统换热过程对浅层与深层土 壤温度扰动规律与理论分析结果一致,进一步验证了仿真分析的有效性。 关键词:主动式温室地暖;温控效果;传热分析;数值模拟

中图分类号: TP24 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017) S0-0308-07

Simulation Analysis and Field Testing of Active Greenhouse Heating System

WANG Xin ZHANG Yuanyuan CHEN Du ZENG Hao XU Miao WANG Shumao (College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper proposed an active greenhouse heating system which focuses on the influence of crop growth under extreme cold weather. At the beginning, the heat transfer process of heating system was analyzed based on thermal equilibrium theory. The temperature control system models were established based on radial and axial heat conduction mathematical analyses respectively. Then, the numerical simulation of two dimensional steady temperature distribution was carried out by means of finite element method (FEM) software. The simulation result indicates the control parameters in the greenhouse. When the effective operation range (later referred to as Q_f) is defied with the soil temperature more than 15° C at 20 cm underground, the temperature of heating system should be opened no less than 28° C. The kinetics is changed in terms of the temperature dependence. If the air intake temperature of heating system is raised by 2° C, the axial effective operating range extends by 2.4 ~ 2.8 m. Later, field test was conducted in greenhouses located in Changping District, Beijing. Compared with simulation data, the field testing data shows that the perturbation law of heating system heat transfer process on shallow and deep layer soil temperature is consistent with theoretical analysis. The simulation parameters could help to guide the greenhouse control.

Key words: active greenhouse heating system; temperature control effect; heat transfer analysis; numerical simulation

引言

近年来,冬季温室夜间温度控制是温室果蔬种 植的一大难题,对严寒地区的影响尤为突出^[1-2]。 受制于冬季夜间室外温度过低、温室构造简易等因 素^[3],冷空气会以热传导的方式从室外进入温室导 致室内温度失控,极易造成冷害、冻害等灾害,进而 大幅削减温室果蔬种植产量^[4-5]。因此,温室大棚 如何在冬季有效保证土壤热能储备、控制土壤温度 成为确保冬季温室作物产量的关键因素^[6]。

以往冬季温室通常使用热风炉、采暖炉等设备 对温室大棚的空气进行加热,利用热空气与土壤的 热交换作用,为土壤提供有效热能,提供适宜棚内作 物有效生长的环境^[7-10],但这些高能耗设备既达不

收稿日期: 2017-09-15 修回日期: 2017-11-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51405492)和国家重点研发计划项目(2017YFD0700603)

作者简介:王新(1982—),女,副教授,博士生导师,主要从事自动化技术与农业工程研究,E-mail: wangxin117@ cau. edu. en

到环保标准,也不符合我国低碳经济政策要求。主 动式温室地暖系统作为一种新型的冬季温室土壤储 能设备^[9-14],日益受到温室大棚农户的青睐,该系 统基于热交换原理,在冬季日间温度较高时开启,将 热空气通过风机从一个位于温室一侧的入风口抽 入,途经埋在地下的地暖管道,由位于温室另一侧的 出风口排出,实现空气热循环,通过地暖管道实现热 空气与土壤的换热及储能过程^[15-18]。

近年来,对主动式温室地暖系统的研究也取得 了较大进展。但研究算法在通用性上略显不 足^[19-20]。本文围绕主动式温室地暖系统在严寒环 境下对温室土壤的温控效果进行研究,通过分析地 暖系统温室环境下的热物理特性,基于热平衡理论, 建立系统径向、轴向传热过程土壤温度场数学模型, 并利用有限元软件进行系统温度场分布状况的数值 模拟及仿真分析,最后通过大棚实地田间试验,进一 步验证分析模型的有效性及准确性。

1 温控分析数学模型

热空气经地暖管道对土壤的换热过程是研究主 动式温室地暖系统温控效果的关键。温室大棚内的 热空气被风机鼓入地暖换热管内,经土壤冷却后从 出风口排出。在此换热过程中主要包括热对流、热 传导和热辐射,在管内条件下热对流和热辐射可以 忽略,影响土壤蓄能的主要因素为地暖管(图1)与 土壤的热传导过程。



图 1 温室地暖系统结构图

Fig. 1 Greenhouse heat system structure

1.1 径向传热模型

对于地暖管道与土壤的传热过程,本文采用控制体积热网络方法分析埋管对土壤温度分布的影响。如图2所示,以地暖管道传送的热空气为中心, 埋管周围介质依次为管壁 PE 材料、深层土壤 T_a(距 土壤表面大于等于20 cm)、浅层土壤 T_a(距土壤表 面小于20 cm),各层之间有热交换。若忽略土壤表 面空气对流换热以外因素对土壤温度的影响,假设 土壤热能沿管径向外部梯度性变化,各层土壤温度 在同一截面内保持均匀分布,不同层的温度交换可 等效为通过热阻、热容耦合模型,其中 c_i为不同层中 的介质热容, R_i为热阻, 如图 3 所示, 其第 i 层 t + 1 时刻的温度可由瞬时体积控制方程获得, 即

$$T_{\iota+1,i} = \frac{\Delta t}{c_i} \left[Q_i + \frac{2(\tau_{\iota,i+1} - \tau_{\iota,i})}{R_{i+1} + R_i} + \frac{2(\tau_{\iota,i-1} - \tau_{\iota,i})}{R_i + R_{i-1}} \right] + T_{\iota,i}$$
(1)



Fig. 2 Space diagram of radial temperature distribution in heating pipes



图 3 地暖管道径向传热过程等效电路图 Fig. 3 Equivalent circuit diagram of heating pipe radial heat transfer process

1.2 轴向传热模型

主动式温室地暖系统在轴向上的热能传递传热 模型可简化为分段式一维瞬态传热模型,在一维有 限元模型基础上,将埋管管道沿管长方向分成 *N* 段,通过对于每一段管长进行能量分析,获得地暖管 道轴向上的温度分布数据(图4)。

为简化模型,作出以下假设:

(1)管道中热空气的热物性参数相同,热空气 沿管道径向温湿度及流速等参数均匀一致。

(2)传热流体为不可压缩的牛顿流体,流动速 度变化可以忽略,换热过程中流体热物性参数不随 时间变化。

(3)土壤初始温度分布均匀,各向同性且热物 性不随时间变化。

(4)忽略地面环境温度变化对土壤热物性的影响。

(5)忽略土壤水分受换热引起的热迁移影响, 换热过程中土壤热物性不变。

基于以上假设,建立地暖系统一维传热平衡方 程为



对于每一小段,入口空气温度T_{n-1},出口空气温 度 T_{a} ,假设每一单元体积换热过程中不会出现凝 结,则换热平均温度为

$$T_{air} = \frac{\int_{0}^{\frac{L}{N}} \left[T_{s} - (T_{n-1} - T_{0}) \exp\left(-\frac{x}{\alpha}\right) \right] dx}{\frac{L}{N}}$$
(3)

$$\ddagger \psi \qquad \alpha = \frac{mc_{air}}{A_{n}h_{c}}$$

式中 L----管道长度,m

N——圆管管道中分段数

α——土壤导热系数,W/(m·K) 则得到单元地暖管道出口温度为

$$T_{n} = T_{n-1} - \alpha \cdot \left\{ \begin{array}{c} \int_{0}^{\frac{L}{N}} \left[T_{s} - (T_{n-1} - T_{0}) \exp\left(-\frac{x}{\alpha}\right) \mathrm{d}x \\ \frac{L}{N} \end{array} \right.$$
(4)

计算机辅助计算及分析 2

为了对主动式温室地暖系统对大棚土壤蓄热作 用进行数值化分析,利用 ANSYS 软件进行了计算机 辅助建模与计算。ANSYS 热分析模块是基于能量 守恒原理导出的热平衡方程,主要包括稳态分析、瞬 态分析、热辐射、相变、热应力以及与热有关的耦合 场分析。通过模型简化,分别对地暖管道的径向及 轴向温度分布情况进行了分析。

2.1 径向传热温度场分析

采用 PLANE55 轴对称单元进行二维热传导分 析,此单元由4个节点构成,每个节点只有一个温度 自由度,适用于热传导稳态、瞬态分析,符合本文中 考虑热空气常速流动的所输送热流要求。根据温室 土壤的实际热物性特点,将温室土壤分为浅层土壤 (距地面 0~0.2 m)及深层土壤(距地面 0.2~6 m) 分别进行属性定义,热物性参数如表1所示。

表1 计算模型中的热物性参数

Tab.1 Calculation model thermal parameters

+# 11	密度/	比热 c _p /	导热系数/	
侠坐	$(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$(\mathbf{J} \boldsymbol{\cdot} \mathbf{kg}^{-1} \boldsymbol{\cdot} \mathbf{K}^{-1})$	$(\mathbf{W}\boldsymbol{\cdot}\mathbf{m}^{-1}\boldsymbol{\cdot}\mathbf{K}^{-1})$	
空气	1.225	1 006	0.0242	
浅层土壤	1 500	1 390	1.12	
深层土壤	2 050	1 450	2.40	
PE 管	940	1 000	0.50	

根据系统结构特点,为提高计算精度及运算效 率,在进行网格化分时,靠近地暖管道处细化网格, 网格尺寸从中心向周围逐渐放大,系统温度径向分 布分析模型及网格划分如图5所示。



Fig. 5 Radial temperature distribution meshing

根据前期测试数据,模拟冬季9:00-12:00时 温室内环境条件,分别设置地暖系统入风口温度 T... 为24、26、28、30℃时,将其作为管道内热源初始温 度进行加载,设置距地面4m处土壤温度为14℃, 地表温度为6℃,冬季换热量按照40 W/m 进行模 拟,地暖系统二维径向稳态温度分布情况如图6所 示。

当地暖管内热空气温度持续保持一定温度时, 管道传热的热平衡结果表明,其加温范围将不会达 到土壤表面,由于土壤表面与空气热对流的存在,地 暖系统土壤加温范围通常辐射不到浅层土壤。由于 通常作物根系分布在地下 20~25 cm 的土壤里,冬 季此区域的土壤温度在 15~18℃ 为宜,因此若将距 地面 20 cm 处土地温升大于 15℃作为地暖系统的有 效作业范围(后文简称为 Q_t),则图 6c、6d 的分析结 果将满足 Q_t 指标要求, 而图 $6a_{6b}$ 由于热空气提供 热能较少,故达到热平衡后仍不能有效升高作物根 系附近土壤温度,不能达到促进作物生长的目的。

2.2 轴向温度分布

通过沿地暖管道轴向进行二级稳态热传导分





析,可以更加直观地了解地暖系统对温室内土壤储 热的贡献,本次分析选择的有限元分析单元类型与 径向温度分布相同,模型网格划分如图7所示。



图 7 轴向温度分布情况网格划分

由于地暖系统工作时入风口吸入热空气,出风 口排出换热后冷空气,在温室内部形成对流,因此, 土壤表面温度加载公式为

 $y = -0.1x + 10 \quad (0 \le x \le 40 \text{ m})$ (5)

式中 x----距入风口距离,m

y——加载温度,℃

管道内部由于换热作用,其轴向加载公式为

y = -0.175x + 27 (-40 m≤x≤0) (6)
设置距土壤表面 4 m 处土壤温度属于无扰动范围,土壤温度为 14℃。冬季换热量按照 40 W/m 进行模拟,入风口温度设置为 28℃,按照地暖系统铺设实际情况,其轴向传播范围为 40 m,地暖系统二

从分析结果可以看出,地暖系统温升辐射范围 沿管道轴向方向逐渐降低,图7中满足 Q_r指标的作

图 8 地暖系统轴向温度分布结果

Fig. 8 Heating system axial temperature distribution results

用点的 x = 22.67 m,即由于地暖管内热空气与土壤 的热能交换作用,地暖管道对土壤的加热效果沿轴 向逐渐减弱。当系统入风口安装在温室大棚一侧 时,土壤接收到地暖系统的加热作用将逐渐减弱。 为进一步对于地暖系统沿轴向上的有效工作范围进 行分析,将入风口热空气温度分别设置为 T_{in} = 24、 26、28、30℃进行二维稳态热分析,取 x = 15 ~ 25 m 为温度场局部放大显示范围,分析结果如图 9 所示。

通过对比分析结果可知,与径向分析结果相似, 若入风口温度较低,如 *T_{in}* = 24℃时,热空气所携带 的热能太少,故对作物根系生长周围的土壤很难达 到加热的目的;伴随入风口温度的升高,系统满足 *Q_i指标的径向辐射范围逐渐增大*,热空气每增大 2℃,其有效径向辐射范围可增加2.4~2.8 m;但受 制于冬季天气影响,大棚内空气温升有限,对于 40 m 的传热范围,地暖管道远端将无法起到有效的

升温作用。

3 试验验证

冬季地暖系统温升效果评估试验在北京市昌平 区的马池口镇北京市农作物品种试验展示基地 25 号大棚内进行,采用实验室自制多点温湿度数据采 集远程监测系统(图 10),于 2015 年 12 月至 2016 年 3 月持续采集 4 个月共 122 d 的温室大棚内及室外 的温度数据。测控系统工作电压 12 V,采样周期 1 h,温度采集精度(±0.2)℃,温度检测范围 -40~ 60℃,湿度采集精度(±0.3)%,湿度监测范围 0~ 100%。

地暖系统的温控效果验证试验根据国家标准 《日光温室和塑料大棚结构与性能要求》中的规定设计 温度测量方案,传感器安装示意图如图 11 所示。

图 11 地暖系统温控效果测试系统示意图 Fig. 11 Temperature testing system

数据采集系统对室外空气温度、地暖系统入风口温度、出风口温度、大棚中部空气温度(分为空高(距地面150 cm)、空中(距地面100 cm)、空低(距地面50 cm))以及大棚中部土壤温度(分为土高(距地面10 cm)、土中(距地面20 cm)、土低(距地面30 cm))进行实时检测,并利用无线网络将检测数据发送回远程监测平台。

由于地暖系统的主要作用,是在寒冷地区严寒 天气条件下,利用日间光照对大棚内空气的加温作 用,通过机械式抽风的方式将热空气导入地下地暖 管道,实现对土壤的加热。因此,选取当日平均温度 在0℃以下的日期作为地暖系统温控效果的样本 (样本数据见表 2,由于数据量较大,仅以 2016 年 1月12、13日当天9:00—16:00点采样数据为例), 分析地暖系统开关对土壤温升作用的影响。

日期	마는 호네	神區工子	室外温度/℃	日均温度/℃	人口温度/℃	出口温度/℃	土壤温度	土壤温度		
	н ј % ј	地吸力大					$\Delta T_{20 \mathrm{~cm}}$ / °C	$\Delta T_{10~{ m cm}}$ / °C		
2016 - 01 - 12	09:00	关	-4.18	- 5. 32	13.96	4.21	2.72	3.75		
	10:00	关	-4.73		16.67	6.65	2.72	4.43		
	11:00	开	-4.18		23.78	12.47	3.40	5.11		
	12:00	开	- 5.88		25.34	15.11	4.08	6.46		
	13:00	开	- 5.13		23.51	15.52	5.43	6.82		
	14:00	开	- 5.00		19.45	16.60	6.11	7.17		
	15:00	开	- 6. 89		17.14	16.20	6.78	7.52		
	16:00	开	- 6. 55		11.52	10.17	7.46	10.17		
2016 - 01 - 13	09:00	关	- 0. 93	- 1. 94	8.68	2.38	3.40	4.75		
	10:00	关	- 4.66		9.83	4.08	3.40	4.75		
	11:00	开	-2.15		12.34	4.69	3.40	4.75		
	12:00	开	-0.87		25.07	13.55	4.08	5.43		
	13:00	开	- 1.00		24.86	17.08	4.75	6.78		
	14:00	开	- 1.81		20.05	15.32	6.11	7.46		
	15:00	开	- 2. 15		18.16	15.18	6.78	8.82		
	16:00	开	- 2. 02		12.07	10.30	6.78	8.82		

表 2 日平均温度 0℃以下样本日采集数据 Tab. 2 Sample date daily average temperature below 0℃ collect data instance

考虑热交换蓄能作用,将入风口与出风口温度 差值 ΔT、距地面 10 cm 处的土壤温升 ΔT_{10 cm}、距地

面 20 cm 处的土壤温升 $\Delta T_{20 cm}$ 作为地暖系统评价指标,对样本数据进行了比较分析,如图 12 所示。

图 12 地暖系统试验样本数据 Fig. 12 Heating system test sample data

通过图 12a 中对于 ΔT 与 $\Delta T_{20 \text{ cm}}$ 两项指标对比 分析,在样本日 15:00—16:00,入风口温度范围为 15~18℃,出风口温度范围 12~15℃,此时 ΔT 不大 于 3℃,地暖管道内热能较低,地暖系统无论开关, $\Delta T_{20 \text{ cm}}$ 变化都不大,无法实现作物有效生长周围土 壤的加热作用,本试验结果与有限元仿真分析结果 类似;当 ΔT 逐渐增大时(图 12b),地暖系统开启 时,对 $\Delta T_{20 \text{ cm}}$ 指标显著升高,地暖系统关闭时土壤温 升效果明显减弱,但与浅层土壤温度 $\Delta T_{10 \text{ cm}}$ 的关系 不明显,此结论与二维稳态径向温度分布结果一致。

4 结论

(1)管道内热空气恒定加载情况下,地暖系统 径向温度热平衡状态下,温度分布效果可以看出,地 暖管道的加热范围有限,当管道内热空气温度大于 28℃时,可满足 Q_f指标要求,实现地暖系统有效作 业,因此,可据此对地暖系统的开启温度需要进行设 置。

(2)地暖系统的温升效果沿管道轴向方向逐渐 减弱,其辐射范围有限,对于系统入风口、出风口分 别安装在大棚两侧的结构,无法实现整个大棚土壤 的全面升温作用,需对其安装结构进行调整。

(3)通过验证试验,进一步验证了数值分析模型的有效性,但验证试验温升结果略低于模拟仿真分析结果,其原因主要是因为二维热分析模型未考虑到温室大棚土壤向温室外散热散失掉的热能。

(4)利用主动式温室地暖系统可有效提高温室 浅层土壤的温度,促进作物根系生长,但目前单边式 送风结构在地暖管道轴向分布的加热范围有限,需 进一步考虑优化地暖系统结构,提升系统运行效果。

参考文献

- 白义奎,刘文合,王铁良,等. 辽沈 I 型日光温室环境及保温性能试验研究[J]. 农业工程学报,2003,19(5):191-196.
 BAI Yikui, LIU Wenhe, WANG Tieliang, et al. Experimental research on environment and heat preservation effect of solar greenhouse: type Liaoshen I[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(5): 191-196. (in Chinese)
- 2 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/OL].农业机械学报,2013,44(4):233-238. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20130441&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/ j. issn. 1000-1298.2013.04.041.

ZHENG Rongjin, ZHUANG Lin, CHI Qing, et al. Thermodynamic analysis of solar-assisted ground source heat pump system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4):233 - 238. (in Chinese)

- 3 廖建尚.基于物联网的温室大棚环境监控系统设计方法[J]. 农业工程学报,2016,32(11):233-243. LIAO Jianshang. Design of agricultural greenhouse environment monitoring system based on internet of things[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 233-243. (in Chinese)
- 4 喻景权."十一五"我国设施蔬菜生产和科技进展及其展望[J].中国蔬菜,2011(1):11-23.
- 5 王铁臣. 京郊日光温室应用调查报告[J]. 农业工程技术·温室园艺,2009(1):13-15.
- 6 柴立龙,马承伟. 玻璃温室地源热泵供暖性能与碳排放分析[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(1):185-191. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? flag = 1&file_no = 20120133&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.033.
 - CHAI Lilong, MA Chengwei. Performance and carbon emission analysis on glass-covering greenhouse heating with ground source heat pump technology [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43 (1): 185 191. (in Chinese)
- 7 蒋国振,胡耀华,刘玉凤,等. 基于 CFD 的下沉式日光温室保温性能分析[J].农业工程学报,2011,27(12):275-281. JIANG Guozhen, HU Yaohua, LIU Yufeng, et al. Analysis on insulation performance of sunken solar greenhouse based on CDF [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12):275-281. (in Chinese)
- 8 毛罕平,王晓宁,王多辉. 温室太阳能加热系统的设计与试验研究[J]. 太阳能学报,2004,25(3):305-309. MAO Hanping, WANG Xiaoning, WANG Duohui. The design and test of greenhouse solar energy heating system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2004,25(3):305-309. (in Chinese)
- 9 赵云龙,于贤昌,李衍素,等.碳晶电地热系统在日光温室中的应用[J].农业工程学报,2013,29(7):131-138. ZHAO Yunlong, YU Xianchang, LI Yansu, et al. Application of electric carbon crystal soil-warming system for tomato production in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(7):131-138. (in Chinese)
- 10 WANG Shuangxi, MA Chunsheng, ZHANG Jing, et al. Substrate heating system with solar energy for greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2003,19(5): 197-203.
- 11 柴立龙,马承伟,刘明池,等.日光温室地源热泵供暖碳足迹的生命周期分析[J].农业工程学报,2014,30(8):149-155. CHAI Lilong, MA Chengwei, LIU Mingchi, et al. Carbon footprint of ground source heat pump system in heating solar greenhouse based on life cycle assessment[J]. Transactions of the CSAE,2014,30(8):149-155. (in Chinese)
- 12 林东亮,沈恩德,张侃谕,等. 玻璃温室地源加热系统模型与控制[J]. 农业机械学报,2009,40(2):151-154. LIN Liangdong, SHEN Ende, ZHANG Kanyu, et al. Greenhouse control using geothermal water heating system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(2):151-154. (in Chinese)
- 13 马春生.主动式温室太阳能地下蓄热系统的研究[D].太谷:山西农业大学,2003. MA Chunsheng. Research of solar energy conserving system in soil for active greenhouse [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2003. (in Chinese)
- 14 张京开,王新,张少宏,等.基于 Web 的日光温室地暖远程测控系统设计[J].农业工程学报,2015,31(增刊2):28-32. ZHANG Jingkai, WANG Xin, ZHANG Shaohong, et al. Design on remote measurement and control system for sunlight greenhouse floor heating based on Web [J]. Transactions of the CSAE,2015,31(Supp.2):28-32. (in Chinese)
- 15 戴巧利. 主动式太阳能空气集热一土壤蓄热温室增温系统的研究[D]. 镇江:江苏大学,2009. DAI Qiaoli. Study on a solar active heating and soil storage system for greenhouses[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009. (in Chinese)
- 16 戴巧利,左然,李平,等.主动式太阳能集热/土壤蓄热塑料大棚增温系统及效果[J].农业工程学报,2009,25(7):164-168. DAI Qiaoli, ZUO Ran, LI Ping, et al. Active solar heating system with soil heat storage for plastic film greenhouse and its effects [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7):164-168. (in Chinese)
- 17 江晴,李戬洪,梅建滨.温室空气-土壤换热系统的数值模拟[J].太阳能学报,2002,23(2):227-232. JIANG Qing, LI Jianhong, MEI Jianbin. Transient simulation of the air-earth heat transfer in greenhouse[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2002, 23(2):227-232. (in Chinese)
- 18 雷海燕,李惟毅,李兆力.地热温室供热节能技术的研究[J].河北工业大学学报,2004,33(6):98-101. LEI Haiyan, LI Weiyi, LI Zhaoli. Research on geothermal greenhouse heating system [J]. Journal of Heibei University of Technology, 2004,33(6):98-101. (in Chinese)
- 19 孙先鹏,邹志荣,赵康,等.太阳能蓄热联合空气源热泵的温室加热试验[J].农业工程学报,2015,31(22):215-221. SUN Xianpeng, ZHOU Zhirong, ZHAO Kang, et al. Experiment on heating effect in greenhouse by solar combined with air-source heat pump[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(22):215-221. (in Chinese)
- 20 夏春海,周翔,欧阳沁,等. 地道通风系统的数值模拟与分析[J]. 太阳能学报,2006,27(9):923-928. XIA Chunhai, ZHOU Xiang, OUYANG Qin, et al. Numerical simulation and analysis of underground duct system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2006, 27(9): 923-928. (in Chinese)