

日光温室地下热交换系统的实验 和优化设计研究

吴德让^①

(北京农业工程大学)

李元哲

(清华大学热能工程系)

于 竹

(北京农业工程大学)

提 要 通过对比观测实验,研究和分析了日光温室采用地下热交换系统,冬季生产喜温蔬菜的可行性和实用性,并且对该设施的节能效果和经济效益作出了客观的初步评价。提出了地下热交换系统的优化设计思想和方法,并编制了优化设计的计算机程序。

关键词 日光温室 地下热交换系统 优化设计

为了检验“日光温室地下热交换系统的理论研究”(以下简称“理论”)一文中所提理论的可靠性和准确性,本文在分析了生产现场实验结果的基础上,提出了地下热交换系统的优化设计方法和设计实例。

1 实验概况与结果

1.1 设施和方法

观测场地:北京市朝阳区十八里店乡蔬菜试验站

观测时间:1992年11月至1993年2月,选择典型晴、阴天进行。

由于经费限制,仅在一栋日光温室中隔离出两个开间的封闭小室,进行地下热交换系统的实验研究。实验小室、对照室的位置以及地下热交换系统的设置如图1所示。

实验期间,室内沿温室纵向种植4排黄瓜(不等高畦)。根据室内种植作物情况,在实验小室内每一排作物畦下面布置一排管道,中部设置一个砖砌集合风道,安装2台风机,风机通过风道将风量分配给各管道。管道两端采用弯头连接后向上直通出地面。管道选用内径 $\varnothing 100\text{mm}$ 陶土管,埋深0.5m,间距1.2m。管道下面铺设一层膨胀珍珠岩保温瓦,目的是为了减少管道系统向下的热损失。

地下热交换系统土壤温度场的测定采用热电偶,热电偶测点布置如图2所示。测点18、20、22、24距地面5cm,17、19、21、23距地面20cm,2、6、10、14距地面45cm,3、1、7、5、11、9、15、13距地面50cm,4、8、12、16距地面55cm。

收稿日期:1993-11-04

^①吴德让,副教授,北京海淀清华东路 北京农业工程大学,100083

比较结果如图 4、图 5 所示,平均偏差分别为 6.0% 和 2.3%。可见,土壤温度场数学模型能够比较真实地反映出土壤温度分布特征、地下热交换系统的状态及工作过程。

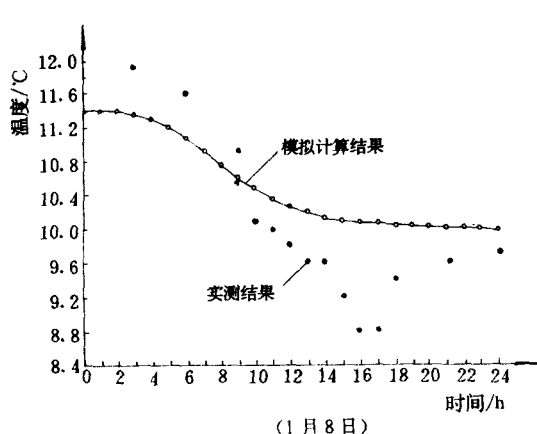


图 4 实验小室 5cm 土壤层温度实测结果与模拟结果

Fig. 4 Testing results and simulating results of soil layer beneath surface 5cm of selected area

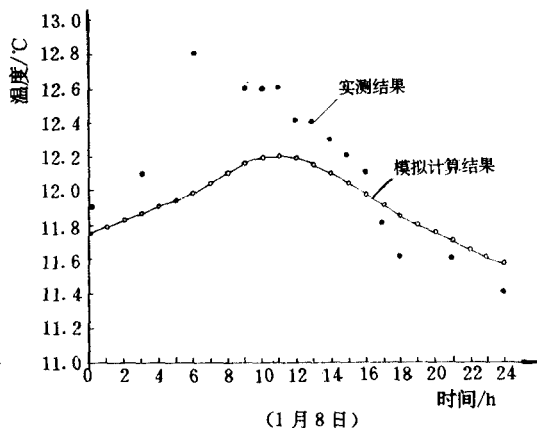


图 5 实验小室 20cm 土壤层温度实测结果与模拟结果

Fig. 5 Testing results and simulating results of soil layer beneath surface 20cm of selected area

1.3 节能效果和经济效益

1.3.1 节能效果

根据实验小室的观测结果,可知地下热交换系统的平均放热速率 $q=2500 \text{ kJ/h}$ 。如果考虑夜间持续放热 7 小时,则地下热交换系统的放热量如表 1 所示。

表 1 实验小室地下热交换系统放热量

Tab. 1 Heat discharge of underground heat exchanger of selected area

小室有效面积 /m ²	7 小时放热量 /kJ · 夜 ⁻¹	30 天放热量 /kJ · 月 ⁻¹	3 个月放热量 /kJ · 冬季 ⁻¹	节煤量 /kg · 冬季 ⁻¹
30	1.75×10^4	5.25×10^5	1.575×10^6	195

注:小室有效面积=小室建筑面积-小室内走道面积

按比例推算,1 栋温室(室内有效面积 300m²)采用地下热交换系统一个冬季的节煤量达 1950kg,节能效果是可观的。

1.3.2 经济效益

从综合评价角度出发,考察地下热交换系统的实用性和可行性,应该考虑设置该系统增加的投资是否可以在较短的时期内收回。实验小室地下热交换系统费用统计如表 2 所示。

表 2 实验小室地下热交换系统费用统计

Tab. 2 Cost of underground heat exchanger of selected area

小室有效面积 /m ²	管材费用 /元	保温瓦费用 /元	风机费用 /元	总费用 /元	单位面积费用 /元 · m ⁻²
30	140	60	140	340	11.33

按比例推算,1栋温度(室内有效面积 300m²)的地下热交换系统总费用约 3400 元。
投资的回收年限 n 可按下式计算:

$$n = \frac{\ln[1-PI(d-e)]}{\ln(\frac{1+e}{1+d})} \quad (2)$$

式中 $PI=AC/(CF \times F)$, 其中 AC 为增加的投资; CF 为煤价, 按 300 元/吨计; F 为节煤量。 d 为银行利率, 设为 11%。 e 为年煤价上涨率, 设为 16%。

计算出地下热交换系统投资的回收年限 $n=5.8$ (冬季)。若地下热交换系统管材选择合适, 其使用寿命可长达几十年。所以, 在日光温室中采用地下热交换系统进行喜温蔬菜的生产, 既是可行的, 又是经济的。

从实验期间黄瓜的长势观察, 试验小室要优于对照小室。由于时间和经费的限制, 未作最后的产量和总效益的对比。

2 优化设计

2.1 设计依据

蔬菜的根系主要生长在距地面 5~30cm 之间的土壤层^[1,2], 如图 6 所示。

为了保证蔬菜根部适温生长, 就应该使整个种植层 5~30cm 区域内的土壤温度, 不超过植物根系生长要求的高限值和不低于其低限值。

在设置地下热交换系统的土壤中, 管内空气温度较高, 管内热量不断地向四周扩散, 热流线呈扩散分布。所以, 在土壤种植层内, 管道正上方的 A 点(如图 6 所示)为该种植层内土壤温度最高点, 两管中心线上的 B 点为该种植层内土壤温度最低点。因此, 只讨论 A 、 B 两点的温度即可。若 A 、 B 两点的温度适宜, 则整个种植层内各点的温度都可以满足植物根系的生长要求。

2.2 设计方法和程序

为了实现优化设计, 先假定一个埋深, 利用“理论研究”一文中的温度场计算程序, 计算出某一时刻土壤温度场分布状况。观察 B 点温度, 若低于植物根系生长要求的低限值很多, 便改变管道系统的埋深, 重新计算、判断, 直至 B 点温度高于或接近低限值为止(接近程度受偏差控制)。这样得到的埋深即为给定计算精度下的最佳埋深。然后, 再依次比较 30cm 土壤层各节点温度, 找出最接近植物根系生长要求高限值的点, 由该点位置即可确定管道系统的最佳间距。

依据上述设计思路和方法, 编制了 FORTRAN 程序。只要给定设计参数, 就可以计算出地下热交换系统的最佳埋深和最佳间距。程序框图略。

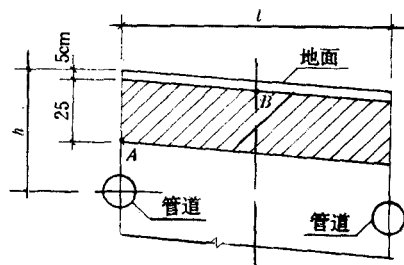


图 6 种植层土壤断面示意图

Fig. 6 Section of soil planting layer

2.3 其它参数对管道埋深和间距的影响

2.3.1 管径的影响

通过计算归纳出,管径对管道埋深和间距的影响规律如图 7、图 8 所示。随着管径的增大,管道的埋深和间距也增大,但其影响效果不大。因此,在选择管道系统时,主要以管道的投资和适用条件为依据,忽略管径不同的影响。

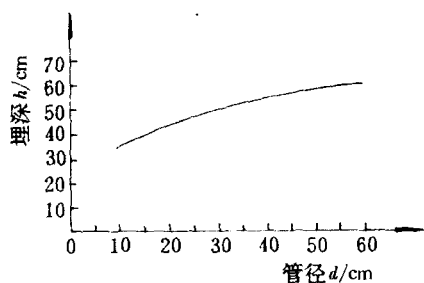


图 7 管径对管道埋深的影响

Fig. 7 Effect of pipe diameter on pipe depth

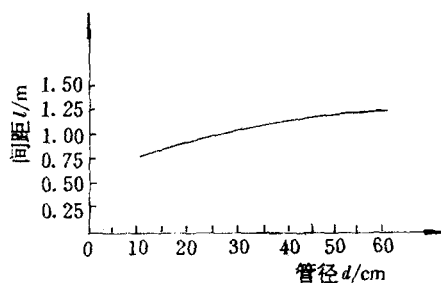


图 8 管径对管道间距的影响

Fig. 8 Effect of pipe diameter on neighbouring pipe distance

2.3.2 土壤导热系数的影响

确定地下热交换系统管道埋深和间距,是以土壤导热所形成的温度场为依据的,所以,土壤导热系数的影响不容忽视。其影响效果如图 9 所示。

管道间距随土壤导热系数的增大而增大,而且变化幅度很大。所以,设计计算时土壤导热系数的取值决定设计的合理性。鉴于上述原因,土壤导热系数应采用冬季蔬菜正常生长条件下,未浇水时,30~40cm 层的土壤导热系数。浇水、松土会使土壤导热系数变化很大。

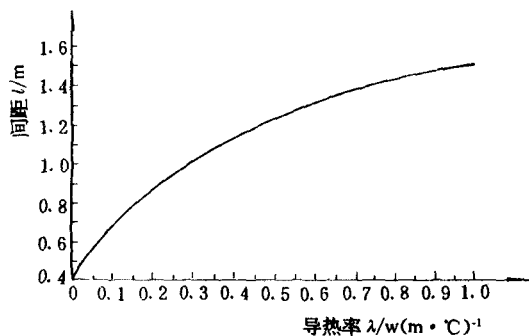


图 9 土壤导热系数对管道间距的影响

Fig. 9 Effect of soil conduct coefficient on neighbouring pipe distance

3 结 语

实验小室观测结果,验证了“理论研究”数学模型的正确性。模型所依据的室

外空气条件、空气和土壤的物性参数等都是比较便于测定的,所以,可以用该模型进行地下热交换系统土壤温度变化的模拟分析,以及地下热交换系统的优化设计。

实验小室观测结果表明,采用地下热交换系统对于冬季生产喜温蔬菜,节约辅助热源的效果十分显著。

参 考 文 献

- 1 北京农业大学主编. 蔬菜栽培学——保护地栽培. 北京: 农业出版社, 1980, 125~128
- 2 吴毅明, 徐师华编著. 温室塑料棚环境管理. 北京: 农业出版社, 1990, 146~154
- 3 北京市气象局编. 北京地区气象资料. 1992

Optimal Design and Test Research of Earth Tube Heat Exchangers in a Sun-Light Greenhouse

Wu Derang

(Beijing Agricultural Engineering University)

Li Yuanzhe

(Tsinghua University)

Yu Zhu

(Beijing Agricultural Engineering University)

Abstract

By means of comparative experimentation, this paper is intended to analyze the feasibility and practicality of raising pro-warm vegetables in winter where the earth tube heat exchangers are used, and to give the objective and initial evaluation on the effect of saving energy and economic benefits of these facilities.

In this paper, the idea and the method of optimal design of earth tube heat exchanger are proposed, and the computer programs of optimal design are developed.

Key words Sun-light greenhouse Earth tube heat exchangers Optimal design