

连栋温室地中热交换系统贮热加温的试验*

马承伟 黄之栋 穆丽君

(中国农业大学)

摘 要 为解决连栋温室冬季能耗大、费用高的问题,进行了采用地中热交换系统部分代替燃煤的贮热加温试验。测定了空气和管道周围土壤贮、放热前后的温度等参数变化,系统在夜间加温能力可达加温热流量 60 W/m^2 ,可有效保证夜间室内气温高于室外 11°C 以上。

关键词 连栋温室 地中热交换系统 贮热 加温 节能

在温室节能方面,日、美、法等国均进行过利用地中热交换系统贮能加温的研究。国内从1983年开始,一些科研单位也相继进行了温室(塑料大棚)地中热交换系统的试验,并已在我国华北、东北地区的一些塑料大棚和日光温室中得到推广应用。

为加速发展我国工厂化高效农业,1997年2月国家科委正式启动工厂化高效农业示范工程项目。该项目的北京分项在北京市科委组织下,由中国农业大学水利与土木工程学院研究开发的华北型连栋塑料温室已于1998年9月在北京市顺义“三高农业示范区”建成。为解决连栋温室冬季运行能耗大、费用高的问题,华北型连栋塑料温室除采用了屋顶双层充气薄膜覆盖、内部设置保温幕等措施加强保温外,并设置了地中热交换系统,进行了将该系统用于大型连栋温室的试验研究。

1 连栋温室地中热交换系统方案

如图1所示,温室为南北脊向,8连跨,跨度8m,共11开间,柱距3m,面积 $2\,112\text{ m}^2$ 。顺温室脊向在地下埋设直径100mm的PVC单壁波纹管,管道采用对称中分式布置方式,以减小管道进出口之间的长度,提高热交换效率并减小送风阻力。管道一端在室内靠近南、北墙处通出地面,另一端通向温室中部管沟,管沟上部安装7台轴流式风机。

管道埋深0.6m,间距0.7m,每跨管道数量11根。从管沟至管道出口约16m,管道数量共计 $2 \times 11 \times 8 = 176$ 根,管道总长2816m,过风总截面积 1.382 m^2 。管道中设计气流速度取作 6 m/s ,则总风量为 $29\,860\text{ m}^3/\text{h}$,每台风机的设计风量为 $4\,265\text{ m}^3/\text{h}$ 。为使管道两端土壤贮、放热均匀,提高换热效果,采用正反转特性相近的双向轴流风机,交替正、反向送风。风机直径400mm,在 $4\,265\text{ m}^3/\text{h}$ 风量时其全压约为285 Pa,配用电机功率1.1 kW。

地中热交换系统的运行方式是,在白天温室内气温高于某设定值(一般为 $20\sim 25^\circ\text{C}$)时,风机启动使室内热空气从地中管道流过向土壤内贮热;在夜间温室内气温低于某设定值(一般为 $8\sim 12^\circ\text{C}$)时,风机启动使室内冷空气从地中管道流过,土壤加热气流,加温热量随气流补充至室内。

收稿日期:1999-04-20

* 国家“九五”工厂化农业重大科技产业工程项目,北京分项(952500801)

马承伟,博士,研究员,北京市海淀区清华东路17号 中国农业大学(东校区)195信箱,100083

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

2 试验结果与分析

2.1 试验方案

试验中测定了地中热交换系统的贮热、放热量以及室内外气温、管周土壤温度的变化情况。采用通风干湿表测定流过管道与土壤热交换前后的气流干、湿球温度,测定位置为:中部与边部的 2 个风机口,中间跨与东、西边跨内每跨 2 个管口(南、北各一个),共测 6 个管口。同时,采用热电偶与电位差计,测定系统运行时管周土壤的温度变化。热电偶分别沿位于中间跨与靠近边跨的南、北各二条管道设置,每条管道 3 个测点,分别布置在靠近进风口、出风口和中部,共 12 个测点,均埋入管道上方距管壁 5cm 处。对管道中的气流流量,采用热球式电风速计,选取从中间跨至边跨的共 24 个管口测定,每个管口按等环面积法测定 12 个点气流速度,取其平均值计算。

2.2 贮热加温效果

系统在 1999 年 3 月中旬安装调试完毕,随后停止使用热水供暖,进行了完全靠地中热交换系统贮热加温的试验运行。表 1 为系统运行时管道贮放热效果的部分测定结果。

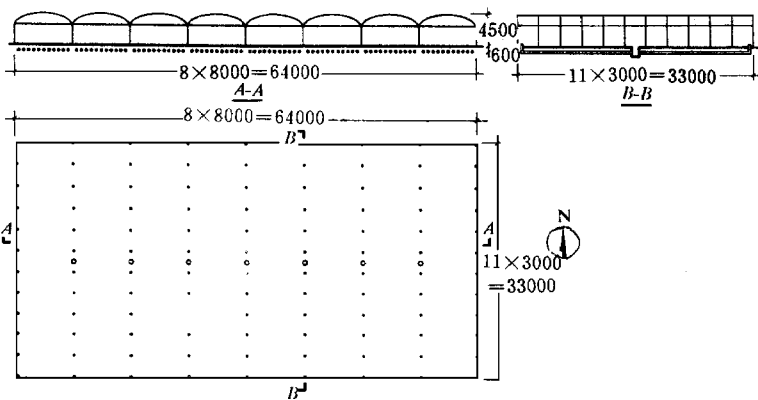


图 1 地中热交换系统布置方案
Fig 1 Underground heat storage system

表 1 地中管道换热效果

Tab. 1 Experiment results of heat exchange between air and pipe

室内外气温与地中热交换管道进出口空气状态变化										土壤温度		
测定时间	室外 气温	室内 气温	进口平均 干球温度	进口平均 湿球温度	出口平均 干球温度	出口平均 湿球温度	进出口 干球温差	进出口 焓差	测定时间	管周 5 cm 土壤平均 温度/		
	/	/	/	/	/	/	/	/kJ·kg ⁻¹				
3 月 21 日	11: 30	2.9	25.2	26.0	23.8	18.5	18.4	- 7.5	- 19.4	3 月 21 日	10: 30	16.1
	12: 30	3.6	27.4	28.1	26.4	21.1	21.0	- 7.0	- 21.6		13: 00	18.1
	13: 30	5.3	28.8	29.4	25.2	21.7	21.6	- 7.7	- 14.1		15: 00	19.1
	14: 30	5.4	27.6	28.2	24.9	20.8	20.6	- 7.4	- 16.4		17: 00	18.7
	15: 30	5.9	26.2	26.8	23.9	20.3	20.3	- 6.5	- 13.4		23: 00	17.4
3 月 22 日	0: 00	- 2.8	10.6	10.1	10.1	14.7	13.9	4.6	9.6	3 月 22 日	1: 00	16.5
	2: 00	- 3.5	9.9	9.5	9.3	14.5	12.8	5.0	8.5		3: 00	16.0
	4: 00	- 3.8	9.2	8.7	8.5	13.8	11.7	5.1	7.5		5: 00	15.6
	6: 00	- 4.0	8.6	8.4	8.1	13.7	11.3	5.3	7.4		7: 00	15.1
4 月 1 日	23: 00	4.8	11.2	11.0	11.0	13.8	13.4	2.8	6.1	4 月 1 日	22: 20	15.7
4 月 2 日	6: 30	4.4	10.8	10.7	10.7	13.4	12.3	2.7	3.9	4 月 2 日	8: 00	14.7

3 月 21 日为晴天,上午 10 时 30 分室内气温达 20 以上,风机开始运行贮热,下午 16 时 25 分结束,持续运行 5 小时 55 分。室内热空气通过管道与土壤换热后气温降低了 6~ 8 ,空气焓值降低了 13~ 20 kJ/kg。管周 5 cm 处土壤平均温度在贮热前为 16 左右,贮热开始后迅速上升,最高达 19 以上。系统停止贮热运行后,管周土壤热量继续向远处传递,温度开始降低。至晚 23 时系统放热运行前,管周 5 cm 土壤平均温度降至 17.4 。

晚间从 23 时 50 分室内气温降至 9 以下时开始运行放热,至 22 日晨 6 时 50 分结束。为

节省热量和风机运行耗能,当加温后室内气温上升到约 11℃ 以上时,风机即停止运行,气温又降低至 9℃ 以下时再运行。因此除去风机累计停歇时间 1 小时 40 分,夜间风机共运行 5 小时 20 分。室内空气通过管道被土壤加温,气温升高了 4~5.5℃,空气焓值增加了 7~10 kJ/kg。管周 5 cm 土壤温度在放热开始后逐步降低,系统运行结束时降至最低,平均约为 15℃。系统放热运行结束后,管周土壤温度低于离管道较远处土壤,热量逐步由远处传来,到 22 日上午开始再度贮热运行前,管周 5 cm 土壤温度又回升至 16℃ 左右。

地中热交换系统运行后,有效地保证了温室内的温度条件。据观测,当夜间室内气温降低到 9℃ 以下时,启动风机加温后约十几分钟,室内气温即可上升近 2℃。由表 1 可见,在夜间室外气温 -2.8~-4℃ 时,室内气温保持在 8.6℃ 以上,维持了 12.6~13.4℃ 的室内外温差。在仅靠地中热交换系统运行加温的期间,夜间室内气温均达到 8℃ 以上,室外气温在 0℃ 以下时,室内外温差均可维持在 11℃ 以上。

2.3 地中热交换系统加温能力的分析

由测定结果,地中热交换系统管道中的气流流量为 27 100~29 800 m³/h。

将测定结果代入下式计算地中热交换系统运行时的管道贮热与放热量:

$$Q = \sum_i \rho_a q_v \Delta h_i \Delta t_i \quad (1)$$

式中 Q ——贮热与放热量, kJ; ρ_a ——空气密度, kg/m³; q_v ——空气流量, m³/s; Δt_i —— i 时段时间, s; Δh_i —— i 时段空气通过管道前后的焓差, kJ/kg。

$$\Phi = Q / \sum_i \Delta t_i \quad \varphi = \Phi / A_s \quad (2)$$

式中 Φ ——贮热或放热流量, kJ/s 或 kW; φ ——单位温室地面面积贮热或放热的热流量, kJ/(s·m²) 或 kW/m²; A_s ——温室地面面积, m²。

由表 1 中的测试数据,计算得出晴天白昼贮热量为 $Q = 3\,430\,000$ kJ, 贮热流量 $\Phi = 161$ kJ/s, $\varphi = 76.3$ W/m²; 夜间放热加温量为 $Q = 1\,528\,000$ kJ, 加温热流量 $\Phi = 79.6$ kJ/s, $\varphi = 37.7$ W/m²。

应指出的是,以上计算的加温热量仅是土壤通过管道换热释放到温室内的热量。实际上土壤中蓄积的热量还有相当部分在夜间会通过温室地面传入室内,这部分热量与管道放热进入温室内的热量之比为^[1]:

$$\beta = k_s A_s / k_p A_p \quad (3)$$

式中 k_s, k_p ——分别为地中土壤通过地面或管壁对空气的传热系数, W/(m²·℃); A_p ——管壁总面积, m²。

对于本试验,计算求得, $k_s = 2.6$ W/(m²·℃), $k_p = 10.2$ W/(m²·℃), $A_p = 884.7$ m², 则有 $\beta = 0.61$ 。因此加上由温室地面传入室内的热量,夜间温室的总加温热流量达到

$$\Phi = (1 + \beta) \times 79.6 = 128.1 \text{ kJ/s}$$

$$\varphi = (1 + \beta) \times 37.7 = 60.7 \text{ W/m}^2$$

此加温热流量对维持温室内温度环境的作用可作如下估算:

对于进行试验的本温室,覆盖材料面积 $A_g = 2\,900$ m²,如取覆盖材料平均传热系数 $k_g = 3.5$ W/(m²·℃),则依靠地中热交换系统可维持的温室内外气温差为:

$$\Phi / (k_g A_g) = 128\,100 / (3.5 \times 2\,900) = 12.6$$

此估算的结果定量地反映了地中热交换系统的加温能力,与实际测定的室内外温差 12.6

~ 13.4 的结果是一致的。

3 问题与讨论

3.1 连阴天时地中热交换系统的效果

这是一个令人关注的问题。在阴天, 白昼温室内达不到贮热所需气温条件, 不能贮热。但只要管周土壤具有一定温度, 夜间仍可运行放热。而且, 由于地下土壤体积和热容量较大, 根据经验和估算, 土壤经一夜放热后, 其平均温度仅下降 1°C 左右, 即使连阴数日, 夜间仍可利用地中热交换系统加温, 只是效果逐渐变差。试验期间 3 月 30 日、31 日和 4 月 1 日是连续三个阴天, 表 1 中列出了连阴第三日即 4 月 1 日夜间接热的试验结果。系统在晚间 22 时 30 分开始运行放热, 次日 6 时 50 分关停。室内热空气通过管道被土壤加温后气温升高了近 3°C , 空气焓值约增加了 $4\sim 6\text{ kJ/kg}$, 夜间放热加温量仍达到 $Q = 1\,490\,000\text{ kJ}$, 室内气温维持在近 11°C 。可见连阴天地中热交换系统的确仍可发挥其作用。

3.2 节能与经济性

在北京地区, 一般加温温室的采暖期是 10 月下旬至次年 4 月中旬, 长达 5 个多月, 消耗燃煤 $600\sim 1\,200\text{ t/hm}^2$ 。根据试验结果与气象资料分析, 北京地区大约 11 月下旬以前和 3 月上旬以后共约 2 个多月的时期内, 靠地中热交换系统即可满足温室内加温的需要。这样可将温室依靠燃料的采暖期缩短, 可望大幅度减少燃煤的消耗量和供暖锅炉的水电用量。而地中热交换系统的运行仅消耗少量的电能, 在本试验中采用的风机总功率为 7.7 kW , 每 m^2 温室面积 3.65 W 。按平均每天运行 12 小时计, 用电量仅 $92.4\text{ kW}\cdot\text{h/d}$ 。在经济上, 地中热交换系统投入较大的是一次性建设费用, 华北型连栋塑料温室地中热交换系统的建设费用约为 4 万元, 约 20 元/m^2 。其中管道材料费用占主要部分, 约为一半。由于其主要部分地中管道的使用年限很长, 可达二、三十年以上, 其每年的折旧费用仍是较低的。如能选用到价廉适用的管道材料, 其一次性建设的投资费用还可进一步降低。将地中热交换系统用于大型连栋温室是初次的试验尝试, 所试验系统从管道的选用和系统的方案等方面还可进一步改进完善, 使用管理方法上还有待逐步积累经验, 其使用效果还可以再提高。有待于今后进一步进行试验研究。

4 结 论

1) 地中热交换系统用于大型连栋温室具有显著的贮热和放热效果, 一般白昼系统运行时, 室内空气向管道贮热后, 气温可降低 $6\sim 8^{\circ}\text{C}$, 空气焓值降低 $13\sim 20\text{ kJ/kg}$ 。夜间室内空气通过管道被土壤加温, 气温升高达 $4\sim 5.5^{\circ}\text{C}$, 空气焓值增加 $7\sim 10\text{ kJ/kg}$ 。

2) 在白昼贮热充足的情况下, 地中热交换系统的夜间加温热流量可达 60 W/m^2 左右。

3) 在室外气温较低的情况下, 结合温室的双层覆盖等保温措施, 采用地中热交换系统加温可有效保证夜间室内气温高于室外气温 11°C 以上。

参 考 文 献

- 1 高仓直, 山川健一. 地中热交换ハウスの设计 1. 定常一次元モデルによる解析. 农业气象(日), 1981, 37(3) 187~ 196

Experiment of Heating & Heat-storing of the Underground Heat Exchange System in a Multispan Greenhouse

Ma Chengwei Huang Zhidong Mu Lijun

(China Agricultural University, Beijing, 100083)

Abstract In China, the cost of production in multispan greenhouse is very high for its high energy consumption. It is necessary to develop the technology of energy saving for multispan greenhouse production. The heating experiment using underground heat storage system, replacing fuel to some extent, was carried out in a multispan greenhouse. It was showed that the solar heat can be stored during the daytime by circulating the warm greenhouse air through the pipes buried in the greenhouse soil, and the heat can be obtained effectively from the soil through the pipes at night. During the daytime, the warm greenhouse air was cooled down and decreased in temperature by $6\sim 8$ and in enthalpy by $13\sim 20$ kJ/kg, after flowed through the pipes and stored heat into the pipes. During the nighttime, the greenhouse air was warmed up and increased in temperature by $4\sim 5.5$ and in enthalpy by $7\sim 10$ kJ/kg, after flowed through the pipes and gained heat from the soil. When the system was run at night, it could give heat for about $60\text{W}/\text{m}^2$ (greenhouse floor) and the inside air temperature of the greenhouse was 11 or higher than outside temperature.

Key words multispan greenhouse, underground heat exchange system, heat storage, heating, energy saving