

基于有限差分法的日光温室地温二维模拟*

何 芬¹ 马承伟² 周长吉¹ 齐 飞¹ 刘晨霞²

(1. 农业部规划设计研究院农业部农业设施结构工程重点实验室, 北京 100125;

2. 中国农业大学农业部设施农业工程重点开放实验室, 北京 100083)

摘要: 为定量分析日光温室土壤热传导过程,合理设置地温提高措施,采用有限差分法构建了日光温室非稳态二维地温模拟模型,并在西北地区日光温室内对该模型进行了试验验证。结果表明:模型能较好模拟冬季日光温室内多层地温,模拟值和实测值之间平均绝对误差为 1.3℃、相对误差为 9.5%、均方根误差为 1.5℃。

关键词: 日光温室 地温 有限差分法 模拟模型

中图分类号: S625.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)04-0228-05

2-D Simulation of Soil Temperature in Solar Greenhouse
Based on Finite Difference Method

He Fen¹ Ma Chengwei² Zhou Changji¹ Qi Fei¹ Liu Chenxia²

(1. Key Laboratory of Farm Building in Structure and Construction, Ministry of Agriculture,
Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China

2. Key Laboratory of Agricultural Engineering in Structure and Environment, Ministry of Agriculture,
China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: For quantitative analysis of soil heat transfer and taking measures to increase temperature, the 2-D unsteady simulation model of soil temperature was built by using the finite difference method. After validating the correctness of the model by the data measured in the solar greenhouse of northwest China, the soil temperature simulated agreed well with the measured data. The mean absolute error was 1.3℃, the mean relative error was 9.5%, and the root mean square error was 1.5℃.

Key words: Solar greenhouse Soil temperature Finite difference method Simulation model

引言

日光温室内土壤起着白昼蓄积太阳热量、夜间放热加温的作用,准确模拟土壤的传热过程和地温变化规律,探明其温度高低和分布、蓄热与放热量及其影响因素,对解决实际工程问题(如防寒沟的设置、地面下沉的作用、提高地温的途径、土壤蓄热放热对室内环境作用程度的分析等)具有实用价值。

目前,国内外学者多利用一维或多维热湿耦合模型对土壤内部热质迁移的机理和规律进行研究^[1-4],但温室湿土中的热湿迁移是一种多元多相

且极其复杂的物理变化过程,若把这些因素都考虑到环境模型中会把问题复杂化。国内一些学者也在基于土壤只存在热传导过程的假设上建立露地或温室内的土壤传热模型^[5-9],但这些模型一般只考虑一维即竖向土壤的传热,且多以地下热交换温室的地温场作为研究对象,在边界和初始条件选取上存在一定局限性。本文采用有限差分法建立日光温室非稳态二维地温传热模型,并以西北地区日光温室为研究对象对模型进行试验验证,以期对日光温室小气候环境建模、改善土壤热状况提供理论依据和参考。

收稿日期: 2012-04-11 修回日期: 2012-05-30

*公益性行业(农业)科研专项资助项目(201203002,200903009)和“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2009BADA4B04-01)

作者简介: 何芬,博士后,主要从事设施环境工程研究,E-mail: hefen_2005@163.com

通讯作者: 齐飞,研究员,主要从事设施农业研究,E-mail: qf2008@188.com

1 研究方法

1.1 模型假设

日光温室土壤是固体、液态水、水蒸气和空气构成的土壤多孔体混合物,其形成涉及导热、毛细流动、分子扩散和蒸汽凝结等综合过程。为了尽量准确描述室内环境变化并减低模型复杂度,作如下假设:①土壤为一种均匀连续、各向同性的多孔介质。②土壤中只存在垂直方向和沿跨度方向的热传导,无内热源,忽略土壤中空气、水分的对流和扩散、沿长度方向的热传导。③地温在一定深度以下常年保持恒温。

1.2 模型构建与模拟算法

日光温室土壤中任意一点的温度 T 可用其空间坐标 x,y,z 和时间 t 表示为函数 $T=f(x,y,z,t)$,只考虑地温在 x,y 方向的变化,则地温的二维非稳态导热方程为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S \quad (1)$$

式中 S ——热源, W/m^3 ρ ——密度, kg/m^3
 c ——比热容, $J/(kg \cdot K)$
 λ ——热导率, $W/(m \cdot K)$

1.2.1 日光温室地下土壤分区及节点划分

地温温度场与温室的几何形状密切相关。温室长宽比较小时,温度场需考虑为三维,但当温室长宽比大于 10 时,取温度场为二维^[10]。日光温室地下土壤分区及节点划分如图 1 所示。土壤沿 x 轴方向分为室外北、墙下、室内北、室内南、室外南 5 个区,各区及不同深度可确定不同的土壤热工参数,不同材料交界处需进行 2 种材料热工参数的综合折算。 y 轴方向,土壤上边界温度变化剧烈,网格间距较小,从上往下,网格间距逐步扩大。 x 轴方向,围护结构及北墙下土壤网格间距需密集划分。

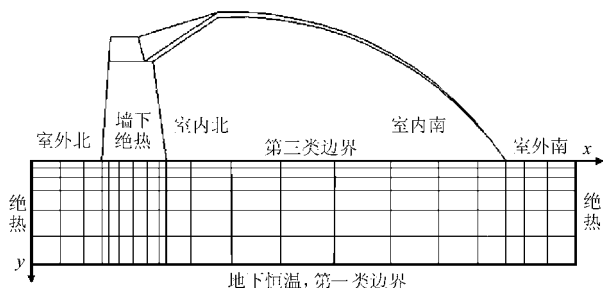


图 1 土壤分区及节点划分示意图

Fig. 1 Soil dividing district and node division

偏微分方程的解法一般采用有限元法和有限差分法,考虑到有限差分法在区域离散方面比较简单、运算速度快,因此采用有限差分法求解方程(1)。

把地温区域划分为矩形网格,矩形两边的距离

分别为 Δx 和 Δy ,采用外节点法将土壤区域离散成为有限数量的单元,单元中心为节点,如图 2 所示。在时间间隔内 $[t, t + \Delta t]$ 内,对控制容积 P 进行积分,并假定控制容积界面上热流密度均匀。

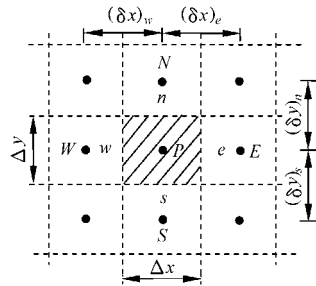


图 2 直角坐标的网格系统

Fig. 2 Grid system in rectangular coordinates

采用全隐格式,对式(1)左边部分(非稳态项)进行积分^[11]得

$$\int_s^n \int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dt = (\rho c)_P (T_P - T_P^0) \Delta x \Delta y \quad (2)$$

对式(1)右边部分前两项(扩散项)进行积分得

$$\begin{aligned} & \int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy dt + \\ & \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^n \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) dy dx dt = \\ & \left[\lambda_e \frac{T_E - T_P}{(\delta x)_e} - \lambda_w \frac{T_P - T_W}{(\delta x)_w} \right] \Delta y \Delta t + \\ & \left[\lambda_n \frac{T_N - T_P}{(\delta y)_n} - \lambda_s \frac{T_P - T_S}{(\delta y)_s} \right] \Delta x \Delta t \end{aligned} \quad (3)$$

对式(1)右边最后一项(源项)进行积分得

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e S dx dy dt = (S_C + S_P T_P) \Delta x \Delta y \Delta t \quad (4)$$

整理上述结果,可得

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + b \quad (5)$$

其中
$$a_E = \frac{\Delta y}{(\delta x)_e} \lambda_e \quad a_W = \frac{\Delta y}{(\delta x)_w} \lambda_w \quad a_N = \frac{\Delta x}{(\delta y)_n} \lambda_n$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_P^0 - S_P \Delta x \Delta y$$

$$b = S_C \Delta x \Delta y + a_P^0 T_P^0$$

$$a_S = \frac{\Delta x}{(\delta y)_s} \lambda_s \quad a_P^0 = \frac{(\rho c)_P \Delta x \Delta y}{\Delta t}$$

1.2.2 模型边界条件

模型采用第三类边界条件的形式为通用形式,因此须将第一类与第二类边界条件均转换为第三类边界条件的形式,即将给定物体边界上任何时刻的温度分布和热流密度分布都转换为给定物体边界与周围流体间的表面传热系数及周围流体的温度。土壤上表面除墙体与土壤接触面视为绝热边界外,其

余部分均为第三类边界条件,表面吸收的太阳辐射热量转化为相应边界单元的内热源(图 1)。土壤左、右边界处,视为垂直方向的一维温度场,即水平方向无温度梯度、无热量传递,故处理为绝热边界。地底下表面处理为第一类边界条件,即为恒温,由于下边界有足够深度,该处设定的边界温度对模拟结果的影响可以忽略,下边界温度可任意设定,一般可设为 20℃。

1.2.3 模型初始条件

采用固定周期条件循环分布法。即在一定的假定初始温度分布情况下,以一周期(24 h)的外界条件的固定变化模式,反复按该周期条件运行程序,使地下温度分布逐渐趋于稳定的周期变化。以相隔一周时间点的温度作比较进行判断,当其前、后变化小于一定值时,认为地下温度场已充分发展,假定的初

始温度分布的影响已经基本消除,达到接近实际的初始分布情况,则以该分布作为程序运行的初始条件。

1.2.4 模型求解

土壤离散传热方程与边界条件方程联立,构成描述地下二维非稳态导热问题的线性方程组。选择高斯-赛德尔(Gauss-Seidel)迭代法对该方程组进行数值求解。

采用 Visual C++ 编制模型求解程序,如图 3 所示。模型静态参数的输入主要包括土壤网格划分的节点数和控制区域的长度、土壤的特性参数(密度、热导率等)以及边界对流换热系数;动态参数的输入主要包括边界条件中室内外空气温度和太阳辐射值(将转化为内热源部分计算)。模型的输出参数为土壤各节点温度。为验证该模型的准确性,将模型求解的地温与实测地温值进行比较分析。

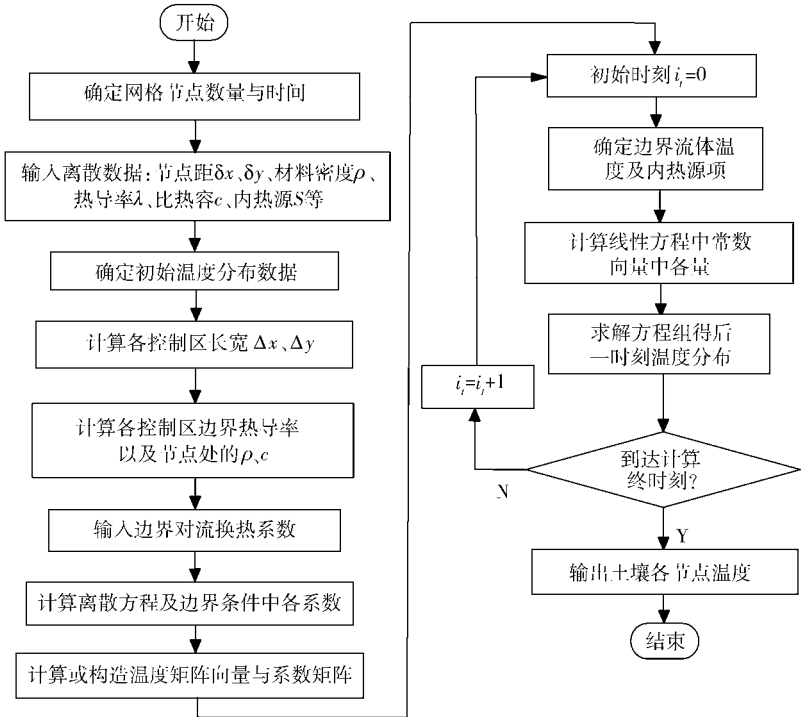


图 3 土壤传热模型求解程序框图
Fig. 3 Block diagram of soil heat transfer calculation program

2 试验结果与分析

2.1 试验条件和方法

为验证模型可靠性,试验于 2009 年 12 月 31 日至 2010 年 1 月 19 日在青海省西宁市湟源县(东经 101°16′,北纬 36°41′)的日光温室内进行。试验温室坐北朝南,北偏东 15°,长 65 m,跨度 6.7 m,后墙高 2 m,脊高 2.7 m,室内地面下沉 40 cm。后墙及山墙均为人工夯实土墙,截面为梯形,上部厚 0.9 m,中部 1.1 m,下部 1.3 m。温室后屋面投影长度 1.3 m,石棉瓦、稻草覆盖,夜间覆盖草帘子保温,卷放时间

为 7:45~8:45,15:15~15:45(文中时间均为当地真太阳时,下同),测试期间,室内种植油菜,正值苗期。

室外气象因子均由室外气象站(Vantage Pro2 型,美国)监测,包括室外温度、相对湿度、风速风向、太阳总辐射、雨量。室内空气温湿度、光照强度由温湿度记录仪(TR-72U 型,日本)和光照度记录仪(ZDR-14 型,中国)测量,地温是在不同深度处理入 T 型热电偶测量,并采用数据采集仪(CR1000 型,美国)外接扩展板(AM16/32B 型,美国)进行数据采集,每 10 min 记录一次数据。

试验观测仪器布点如图 4 所示。 A 、 B 、 C 为地温测点,热电偶埋深为 0、4.5、12、30 和 50 cm; D 、 E 、 F 为温室温度、相对湿度、光照度观测点,距地面高度均为 1.3 m。

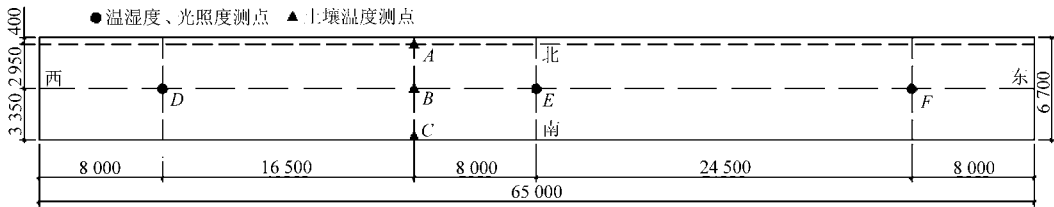


图 4 日光温室测点分布

Fig. 4 Measuring points distribution in solar greenhouse

2.2 试验结果分析

由于温室内的温湿度受多种因素的影响,因此室内的温湿度在水平、垂直方向上分布存在一定的不均匀性,为减少误差,室内温湿度的实测值均采用所布置测点的平均值进行处理。

选取 2010 年 1 月 1 日~2010 年 1 月 18 日的室内外气象条件参数作为已知输入参数对日光温室内

地温进行模拟,步长取 10 min。图 5 为 B 测点 0、4.5、12、30 和 50 cm 深地温的实测值和模拟值变化曲线, A 点、 B 点及 C 点的实测与模拟值之间的误差统计分析如表 1 所示。所有测点($2\,248\times 15$ 个测点=36 720 个样本)的平均绝对误差(MAE)为 1.3°C ,平均相对误差(MRE)为 9.5%,平均均方根误差(RMSE)为 1.5°C 。

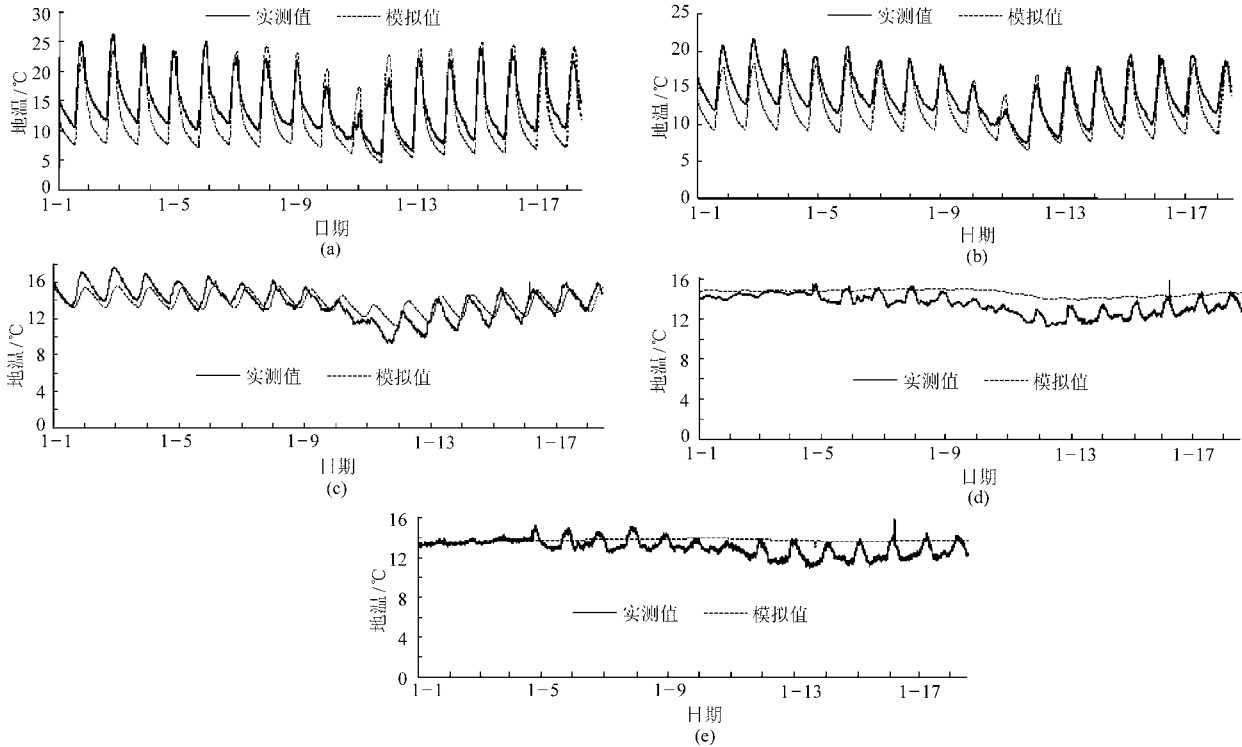


图 5 地温实测值和模拟值变化曲线

Fig. 5 Curves of measured and simulated soil temperature

(a) 0 cm (b) 4.5 cm (c) 12 cm (d) 30 cm (e) 50 cm

表 1 模型误差统计

Tab. 1 Model error statistics

土层 深度/cm	测点 A			测点 B			测点 C		
	MAE/°C	MRE/%	RMSE/°C	MAE/°C	MRE/%	RMSE/°C	MAE/°C	MRE/%	RMSE/°C
0	2.4	15	3.2	2.6	20	2.7	2.1	15	3.2
4.5	1.4	10	1.8	2.0	14	2.3	1.2	9	1.5
12	0.8	7	1.1	0.9	7	1.1	0.8	7	1.0
30	0.7	6	0.9	1.2	8	1.3	0.6	5	0.7
50	0.9	8	1.1	0.8	6	1.0	0.6	5	0.7
平均值	1.2	9.2	1.6	1.5	11	1.6	1.1	8.2	1.4

3 结束语

通过分析日光温室土壤热传导过程,采用有限差分法构建了日光温室非稳态二维地温模拟模型。基于西北地区日光温室对所建模型进行了试验验证,结果表明该模型能较好模拟冬季日光温室内多层地温,模拟值和实测值之间平均绝对误差为1.3℃,平均相对误差为9.5%,平均均方根误差为1.5℃。

地温场模拟中出现的误差源于模型中的各种参

数输入,如设置的边界条件、初始条件是否合理、求解方法是否适用、土壤的各种热特性参数是否准确等都会对模拟结果产生影响。准确测量土壤的热特性参数比较困难,目前,模型中只根据土壤深度设定不同土壤热特性参数,不考虑土壤成分、含水率等的变化对其产生的影响。同时,实际生产中,日光温室地温除受太阳辐射、室内外温度等环境参数影响外,还与栽培作物的品种与密度有关系,所建模型未考虑作物对地温的影响,有待进一步分析和改进。

参 考 文 献

1 Qin Zhihao, Perdro Berliner, Arnon Karnieli. Numerical solution of a complete surface energy balance model for simulation of heat fluxes and surface temperature under bare soil environment[J]. Applied Mathematics and Computation, 2002, 130(1): 171 ~ 200.

2 Al-Kayssi A W. Spatial variability of soil temperature under greenhouse conditions[J]. Renewable Energy, 2002, 27(3): 453 ~ 462.

3 Usavadee Tuntiwaranuruk, Sirichai Thepa, Suvit Tia, et al. Modeling of soil temperature and moisture with and without rice husks in an agriculture greenhouse[J]. Renewable Energy, 2006, 31(12): 1 934 ~ 1 949.

4 范爱武, 刘伟, 王崇琦. 不同环境条件下土壤温度日变化的计算模拟[J]. 太阳能学报, 2002, 24(3): 167 ~ 171.
Fan Aiwu, Liu Wei, Wang Chongqi. Simulation on the daily change of soil temperature under various environment conditions[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2002, 24(3): 167 ~ 171. (in Chinese)

5 杜军, 王怀彬, 杨励丹. 温室内气温与土温相关性传热模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2000, 32(5): 1 ~ 4.
Du Jun, Wang Huaibin, Yang Lidan. Interactive heat transfer of air and soil temperature in greenhouse[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2000, 32(5): 1 ~ 4. (in Chinese)

6 吴德让, 李元哲, 于竹. 日光温室地下热交换系统的理论研究[J]. 农业工程学报, 1994, 10(1): 137 ~ 143.
Wu Derang, Li Yuanzhe, Yu Zhu. Theory research on earth tube heat exchanges in sun-light greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 1994, 10(1): 137 ~ 143. (in Chinese)

7 马春生, 张静, 王双喜. 日光温室地温模型及数值模拟[J]. 山西农业大学学报, 2004, 24(1): 82 ~ 85.
Ma Chunsheng, Zhang Jing, Wang Shuangxi. A model and numerical simulation of soil temperature in solar greenhouse[J]. Journal of Shanxi Agricultural University, 2004, 24(1): 82 ~ 85. (in Chinese)

8 杨晓光, 陈端生, 郑海山. 日光温室气象环境综合研究(四)——日光温室地温场模拟初探[J]. 农业工程学报, 1994, 10(1): 150 ~ 156.
Yang Xiaoguang, Chen Duansheng, Zheng Haishan. A comprehensive research on the meteorological environment in sun-light greenhouse(Ⅳ)—a preliminary study in simulating the soil temperature field of greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 1994, 10(1): 150 ~ 156. (in Chinese)

9 何雨, 须晖, 李天来, 等. 辽沈Ⅰ型日光温室地温预测模型及数值模拟[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(16): 8 687 ~ 8 689.
He Yu, Xu Hui, Li Tianlai, et al. Forecasting model and numerical simulation of soil temperature in greenhouse[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(16): 8 687 ~ 8 689. (in Chinese)

10 彦启森, 赵庆珠. 建筑热过程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986: 26 ~ 30.

11 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 86 ~ 87.

(上接第 238 页)

17 Arif Hepbasli. Exergetic modeling and assessment of solar assisted domestic hot water tank integrated ground-source heat pump systems for residences[J]. Energy and Buildings, 2007, 39(12): 1 213 ~ 1 216.

18 Arif Hepbasli. A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, 12(3): 602 ~ 603.

19 Hikmet Esen, Mustafa Inalli, Mehmet Esen, et al. Energy and exergy analysis of a ground-coupled heat pump system with two horizontal ground heat exchangers[J]. Building and Environment, 2007, 42(10): 3 610 ~ 3 611.

20 赵海波, 杨昭. 水源热泵系统的热力学分析[J]. 节能技术, 2004, 22(3): 29 ~ 32.
Zhao Haibo, Yang Zhao. Thermodynamic analysis of water source heat pump[J]. Energy Conservation Technology, 2004, 22(3): 29 ~ 32. (in Chinese)

21 Onder Ozgener, Arif Hepbasli. A parametrical study on the energetic and exergetic assessment of a solar-assisted vertical ground-source heat pump system used for heating a greenhouse[J]. Building and Environment, 2007, 42(1): 17 ~ 18.