

温室环境分析中冬季室外气温日变化及数学表达

徐 凡, 马承伟*

(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)

摘 要: 在温室热环境准确的动态分析中室外逐时气象数据是不可缺少的, 但系统完整的室外逐时气温气象观测资料相对较少, 为此, 该文研究了 2009—2011 年冬季 1 月份室外气温的日变化规律。根据连续 2 a 的观测数据, 分析了华北 5 省区 2009—2011 年 1 月份室外气温的逐时变化情况, 并归纳出根据日最高气温和日最低气温采用温度逐时变化系数计算逐时气温的方法。结果表明, 该方法所得的室外逐时气温模拟结果与实测温度较为吻合。在此基础上, 采用傅立叶级数展开的方法, 给出了推算冬季任意时刻室外气温的数学表达式。该文为温室环境的精确模拟分析提供详尽的室外温度数据。

关键词: 温室, 温度, 傅立叶级数, 室外逐时气温, 气温逐时变化系数, 环境分析

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.12.026

中图分类号: S161.2; S62

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-12-0203-07

徐 凡, 马承伟. 温室环境分析中冬季室外气温日变化及数学表达[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 203—209.

Xu Fan, Ma Chengwei. Daily change and math-expression method of outside temperature in winter for greenhouse environmental analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(12): 203—209. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

近年来, 随着温室的大规模发展, 对温室内环境分析模拟评价的研究也逐渐深入和细化。室外气象要素是影响温室热环境分析的主要因素, 温室内环境的模拟分析依赖于室外气象条件, 特别是太阳辐射、温度、云量、风等^[1-2]。用计算机进行动态模拟预测及软件开发时, 必须要输入一些室外气象参数, 如果缺少逐时的气象数据, 则很难对温室的热环境进行精确的模拟分析^[3-21]。目前公布的气象数据中, 逐时数据较少, 多数气象站只有 4~8 次/d 的观测值。虽然在科研和生产中的连续气温观测记录有很多, 但要得出温室环境模拟时所需的典型日变化规律, 还需进行系统的研究和整理。本文将对室外气温的逐时模拟进行探讨。因为室外气温呈现周期性变化, 目前使用较多的逐时模拟方法主要是插值法, 包括拟合多项式法, 傅立叶级数法 (FFT 插值),

线性插值, 拉格朗日插值法, 三次样条插值法, 神经网络及诱导网络等^[22-26]。但这些插值法计算公式较为复杂, 且基本都是基于气象站报表中的 4 次/d (6 或 8 次/d) 的数据进行插值获得逐时数据。

本文结合温室的模拟特点, 参照建筑上暖通空调领域的研究方法^[27], 对华北地区实测的逐时数据进行归一化处理, 进而得到温度逐时变化系数; 使用计算得到的逐时变化系数简化温室环境分析中室外逐时气温的模拟方法, 以期为温室环境的准确模拟提供依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源

研究数据资料来自于本实验室 2009—2011 年连续 2 a 冬季在北京、天津、河北、山东、山西 5 省区共 14 个地点的实测室外温度数据, 各测点的分布及地理位置详见表 1。从经纬度分布来看, 测点东至 118.73°E, 西至 111.33°E, 南至 35.63°N, 北至 39.92°N, 位置在华北地区分布广泛, 测点具有一定的代表性。

由于日光温室主要用于冬季园艺作物的生产, 而其环境分析中最多的是采用最冷月 1 月份的室外气温作为室外温度条件。因此取各地 2009—2011 年 1 月份测试结果研究 1 月室外气温逐时变化规律, 并将其用于温室的动态模拟预测及评价。

测试仪器为日本 Esupekkumikku 有限公司的 RS-12/13 温湿度记录仪, 测量范围为 -40~110℃, 精度为 ±0.3℃, 数据采集间隔为 10 min。

收稿日期: 2013-03-08 修订日期: 2013-05-13

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金 (CARS-25-D-04); “十一五” 国家科技支撑计划 (2009BADA4B04); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201203002); 新疆维吾尔自治区科技计划项目 (201130104-4-1)

作者简介: 徐 凡 (1982—), 女, 辽宁人, 博士生, 主要从事设施园艺环境工程研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083。

Email: luckyfan@126.com

*通信作者: 马承伟 (1952—), 男, 重庆人, 教授, 博士生导师, 主要从事设施园艺环境工程研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083。Email: macwbs@cau.edu.cn

农业工程学会会员: 马承伟 (E04110006S)

表1 各测点的地理位置及测试年份

Table 1 Geographic positions and testing years of each testing site

地点 Site	测点数量 Number	经度 Longitude/(°)	纬度 Latitude/(°)	海拔高度 Altitude/m	测试年份 Testing Years
北京房山	1	115.98	39.92	51	200—2011
天津西青	2	117.0	39.13	5	2009—2011
天津宝坻	1	117.3	39.75	7	2010—2011
河北满城	1	115.45	38.95	42	2009—2010
河北枣强	1	115.72	37.52	25	2009—2010
河北肃宁	1	115.82	38.43	14	2010—2011
山东寿光	3	118.73	36.86	20	测点1: 2009—2011; 测点2,3: 2010—2011
山西曲沃	4	111.33	35.63	462	测点1: 2009—2010; 测点2-4: 2010—2011

1.2 研究方法

数据处理中,分别计算各个测点的逐时温度系数,然后将其在同省份内进行对比,若相差不大,则取平均值代表。之后再对不同省份之间的温度逐时变化系数进行对比,若省份间差异不大,则也可用同一系数来表达。具体计算方法步骤如下:

1) 各测点分别处理。

2) 由于各测试点所处的经度不同,需要进行真太阳时校正。即将测试时间换算为真太阳时,逐日取真太阳时整点时刻的温度。再以某一时刻1月份所有测试日温度的平均值作为该时刻的温度,并依次计算1月份24h逐时温度。

3) 数据进行归一化处理,计算温度逐时变化系数。

根据式(1)

$$t = \bar{t} + \beta \cdot \Delta t \quad (1)$$

式中, t 为某时刻的室外气温, °C; β 为该时刻的温度变化系数; Δt 为气温日较差,由日最高和最低气温计算得到, °C; \bar{t} 为日平均气温, °C,可由式(2)简化计算

$$\bar{t} = \frac{t_{\max} + t_{\min}}{2} \quad (2)$$

式中, t_{\max} 为日最高气温, °C; t_{\min} 为日最低气温, °C。由式(1)和式(2)可知,各地室外温度逐时变化系数 β 为

$$\beta = \frac{t - \frac{t_{\max} + t_{\min}}{2}}{\Delta t} \quad (3)$$

通过计算可得到1个测点1月份1天24h的室外气温逐时变化系数。同一方法即可得到各个测点的温度逐时变化系数。

4) 各测点按省份取平均值,即可得到各个省份的温度逐时变化系数。

5) 对比各省份的变化系数,若结果一致,则取平均值作为华北地区冬季室外气温变化系数。

通过以上计算,在已知日最高、最低气温的条件下,即可计算任一整点时刻的室外温度。

对得到的室外温度逐时变化系数采用傅里叶级数展开,便可以计算冬季任意时间点的室外气温。

2 结果与分析

2.1 室外气温日变化规律

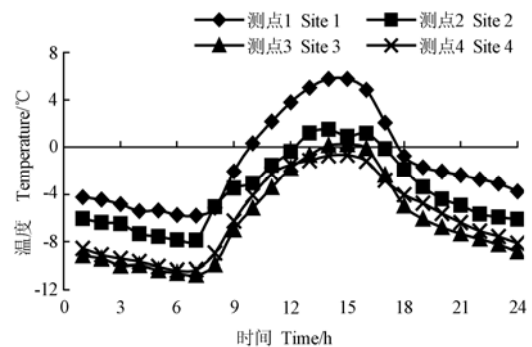
2.1.1 同省份室外温度逐时变化特征

为了检验数据的可靠性,将各个测点的实测数据分别与气象局监测数据进行了对比,所测得的室外温度与气象局数据接近,因此测试数据可信。

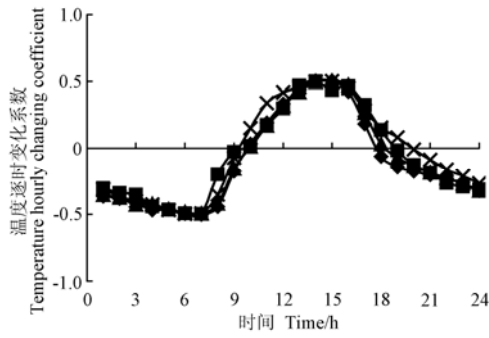
首先对各个测点分别进行温度逐时变化系数的计算,选取有代表性的2个省区山西省和天津市为例进行计算和分析。

由于山西的测点位置偏南,纬度较低,因此1月份山西省室外气温较高,日最高气温可达到0以上,由图1a可知,山西4个测点在不同时间测得的室外温度变化趋势相近,但不同地点和年份间温度值波动较大,经过归一化处理后的温度逐时变化系数则呈现明显一致的规律性,且值很接近(图1b),经检验 $\alpha=0.90$,各曲线无显著差异。

天津测点在所有测试区域中位置偏北,天津地区1月份室外气温总体低于山西,日最高气温不高于0。由图2a可知,各测点在测试的2a中室外气温接近,变化趋势一致。经过归一化计算之后,各测点的温度逐时变化系数曲线呈现高度的一致性(图2b),经检验 $\alpha=0.91$,各曲线之间无显著差异。



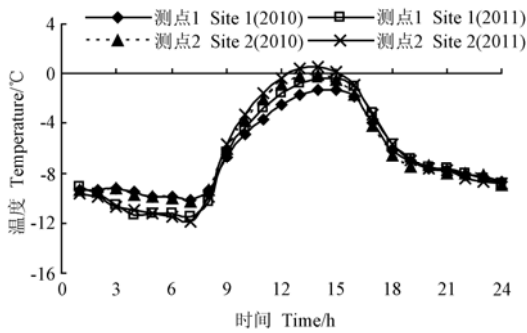
a. 实测温度
a. Measured value



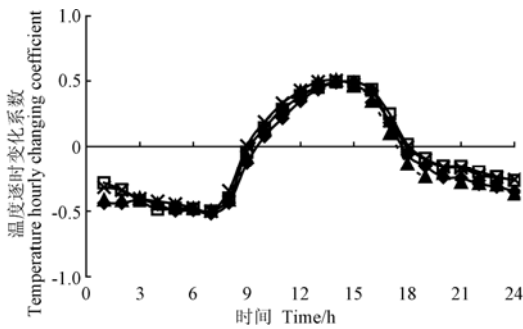
b. 计算得到的温度逐时变化系数
b. Calculated temperature hourly changing coefficient

图 1 山西省 2009 - 2011 年各测试点逐时温度日变化

Fig.1 Hourly temperature change of each test site from 2009 to 2011 in Shanxi



a. 实测温度
a. Measured value



b. 计算得到的温度逐时变化系数
b. Calculated temperature hourly changing coefficient

图 2 天津地区 2009 - 2011 年各测点逐时温度日变化

Fig.2 Hourly temperature change in a day of each test site from 2009 to 2011 in Tianjin

其他 3 个省区（北京、河北、山东）的测点数据进行了同样的计算分析，各省区内的测点得到的温度逐时变化系数也非常接近，无显著性差异。通过以上分析，可以看出，采用逐时温度系数法在同一省区内计算室外 24 h 温度日变化是完全可行的，不受时间地点的限制，可以由统一的系数表达。

2.1.2 华北 5 省区室外温度逐时变化特征

对上述得到的华北地区 5 省区 1 月份的室外温度逐时变化系数进行对比分析，如图 3 所示，计算得到的各省份温度逐时变化系数趋势相同，

$R^2=0.9704$ 。经检验，各时刻 5 省区温度系数之间的差异不显著， $\alpha=1.00$ ，因此可以将 5 省区的温度逐时变化系数取平均，由统一的变化系数来表示冬季 1 月份室外气温的日变化。

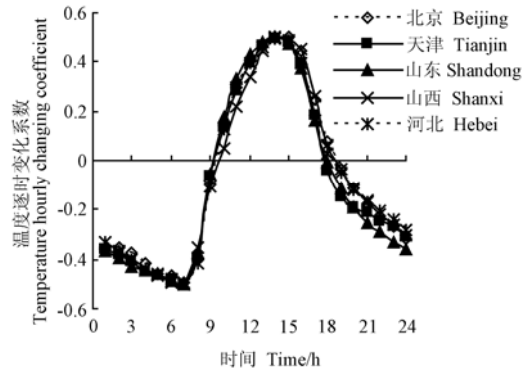


图 3 各省区 1 月份室外温度逐时变化系数对比

Fig.3 Contrast of outside air temperature hourly changing coefficient of each province in January

通过以上分析，得到华北 5 省区 1 月份的室外温度逐时变化系数，见表 2。由表 2 可知，华北 5 省 1 月份室外气温最低值出现在早 06:00~07:00，最高值出现在下午 14:00~15:00。其余时刻温度在此范围内波动。

表 2 华北 5 省区 1 月份室外气温逐时变化系数

Table 2 Outside air temperature hourly changing coefficient of five provinces in North China in January

时刻 Time	温度逐时变化系数 β Temperature hourly changing coefficient
1	-0.35
2	-0.37
3	-0.40
4	-0.44
5	-0.46
6	-0.48
7	-0.50
8	-0.39
9	-0.09
10	0.12
11	0.28
12	0.39
13	0.46
14	0.50
15	0.49
16	0.41
17	0.20
18	0.02
19	-0.08
20	-0.15
21	-0.19
22	-0.24
23	-0.27
24	-0.31

2.2 冬夏逐时温度系数对比

将计算得到的冬季系数与暖通空调中给出的夏季逐时温度变化系数^[27]进行对比,一方面是由于暖通空调计算冬季采暖负荷时,是按稳态传热计算,因此计算时不需要全天的空气温度变化数据,所以相关计算规范也没有提供冬季逐时气温的变化系数,仅提供了夏季的逐时气温变化系数。但夏季的气温变化系数是否可以适用于温室冬季模拟时采用?必然要将本文获得的针对冬季模拟的气温变化系数与暖通空调计算夏季的气温变化系数进行对比。另一方面,正是通过对比夏季的气温变化系数,说明了冬季的气温变化有其自身的特点,不能够采用夏季的气温变化系数,两者是有差异的。正因为如此,本文的工作就是要研究分析得出冬季应采用的气温变化系数。

由图 4 可知,2 套系数在最低气温出现的时间上差异较大,暖通空调给出的系数最低温出现在凌晨 05:00,而本文计算得到的冬季系数最低温出现在 07:00,这与日出时间密切相关。此外,两者午后的温度下降趋势也不同,暖通空调中温度降低相对平缓,而本文得到的温度日变化中,午后温度迅速下降,19:00 之后逐渐平缓。2 条曲线呈现出明显的差异,这是由于暖通空调中给出的系数适用于夏季,在空调负荷分析中使用,并不适用于冬季及温室的环境分析。而本文计算得到的是冬季室外气温变化,主要用于冬季温室环境分析。

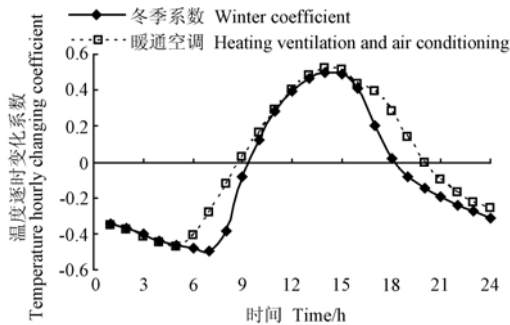


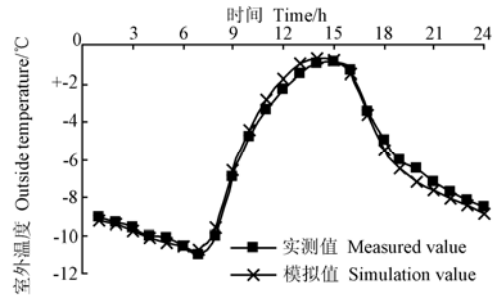
图 4 温室冬季室外温度日变化与暖通空调中温度逐时变化系数对比

Fig4 Comparison of temperature hourly changing coefficient between greenhouse outside temperature in winter and heating ventilation and air conditioning (HVAC)

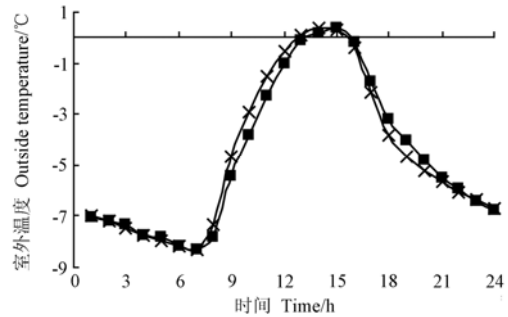
参照此系数表,在仅知道日最高、最低气温的条件下,根据式(3)就可以得到 1 月份 24 h 室外逐时温度,便可进行温室的热环境分析。

2.3 模拟方法的验证

2011 年 1 月、2012 年 1 月分别对天津宝坻区新开口镇、北京通州区的室外气温(此数据未用于逐时气温变化系数的构建)进行了测试。验证结果见图 5。



a. 天津宝坻区新开口镇
a. Xinkaikou Town, Baodi District, Tianjin



b. 北京通州区
b. Tongzhou District, Beijing

图 5 天津新开口镇和北京通州区室外逐时温度模拟结果
Fig.5 Simulation result of outside hourly temperature in Xinkaikou Town, Tianjin and Tongzhou, Beijing

统计分析结果表明(表 3),天津宝坻区新开口镇和北京通州区的模拟室外气温与实测值的平均误差仅为 0.3°C,可见运用逐时温度系数法进行的温室 1 月份室外 24 h 逐时温度简易模拟,其结果较好地反映了测试区 1 月份的室外逐时温度变化。

表 3 室外逐时气温实测值和模拟值的统计分析
Table 3 Statistical analysis between measured and simulation values of outside hourly temperature

地点 Site	相关系数 R^2 Correlation coefficient	信度系数 α Reliability coefficient	平均误差 Average error/ $^{\circ}\text{C}$
天津市宝坻区新开口镇	0.9898	0.9971	0.3
北京市通州区	0.9821	0.9956	0.3

2.4 任意时刻室外气温的计算方法

根据以上室外气温变化系数研究结果,采用插值法即可计算任意时间的室外气温,但一般的插值法计算麻烦,并且 2 点之间为直线插值,并不能完全反映实际情况。因此,将 24 h 室外逐时温度展开表达为傅立叶级数,并编制了相应的程序,展开方法根据马承伟等(2005)^[28]。经过对比,发现取七项三角函数展开的曲线拟合性最好。展开式为

$$t = \frac{t_{\max} + t_{\min}}{2} + (t_{\max} - t_{\min}) \left[t_p + \sum_{i=1}^n A_i \cos\left(\frac{2i\pi\tau}{24} - \phi_i\right) \right] \quad (4)$$

式中， t 为谐波分析后，由各阶谐量和平均温度叠加后得出的 τ 时刻的温度， $^{\circ}\text{C}$ ； t_p 为校正系数，经计算，此处取值-0.07875； A_i 为相应于第一阶，第二阶、……谐量的振幅， $^{\circ}\text{C}$ ； ϕ_i 为第一阶、第二阶、……谐量的相位角， rad ； τ 为时刻， h 。

其中， A_i 和 ϕ_i 的计算公式为

$$A_i = \frac{\sqrt{M_i^2 + N_i^2}}{t_{\max} - t_{\min}} \quad (5)$$

$$\phi_i = \arctan \frac{N_i}{M_i} \quad (6)$$

其中，

$$M_i = \frac{1}{12} \sum_{\tau=0}^{23} t_{\tau} \cdot \cos \frac{2i\pi\tau}{24} \quad (7)$$

$$N_i = \frac{1}{12} \sum_{\tau=0}^{23} t_{\tau} \cdot \sin \frac{2i\pi\tau}{24} \quad (8)$$

各展开项 A 、 ϕ 的取值见表 4。

表 4 任意时刻室外气温计算式中 A 、 ϕ 的取值

Table 4 Value of A and ϕ in equation of outside temperature at any time

振幅 Amplitude	取值 Value	相位角 Phase angle	取值 Value
A_1	0.44304	ϕ_1	3.81799
A_2	0.17535	ϕ_2	0.62911
A_3	0.01535	ϕ_3	3.29853
A_4	0.04321	ϕ_4	4.07162
A_5	0.02597	ϕ_5	0.96904
A_6	0.00417	ϕ_6	1.57080
A_7	0.01739	ϕ_7	4.44066

根据式 (4)、表 4 及日最高、最低气温，即可模拟计算 1 月份华北地区任意时间的室外气温。便可使用此结果进行温室环境动态模拟。

3 结论与讨论

本文通过计算，确定了华北 5 省区 1 月份室外气温逐时变化系数，经过检验，该系数真实反映了 1 月份室外气温的整体变化规律，平均误差仅为 0.3°C 。据此可计算任意整点时刻的室外气温，简化了 24 h 整点温度的计算。同时通过付立叶级数展开，给出了冬季任意时间室外气温的数学表达式，可以用来计算华北地区 1 月份任意时间点的室外气温，进而用于温室热环境的动态模拟预测及评价中。

但由于观测数据的限制，只进行了 2 a 的测试，测试地点也有限，因此还有待更多时间和地点的观测数据来进行检验。同时，室外气温受到纬度、地形、天气状况、其他气象要素等多方面因素的影响，该系数只能整体反映 1 月份日光温室外的气温状况，当具体到某一天，或者遇到温度突变时，室外

温度的模拟效果则存在一定的偏差，需要在今后的研究中，结合其他条件逐渐改进。

[参 考 文 献]

- [1] 崔建云, 董晨娥, 左迎之, 等. 外部环境气象条件对日光温室气象条件的影响[J]. 气象, 2006, 32(3): 101-106.
Cui Jianyun, Dong Chen'e, Zuo Yingzhi, et al. The influence of outside meteorological conditions on conditions inside greenhouse[J]. Meteorological, 2006, 32(3): 101-106. (in Chinese with English abstract)
- [2] 信志红, 薛晓萍, 盖世民. 外部气象条件对室内温湿变化的影响[J]. 气象与环境科学, 2009, 32(2): 30-32.
Xin Zhihong, Xue Xiaoping, Gai Shimin. Effects of external weather conditions on the temperature and humidity inside greenhouse[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2009, 32(2): 30-32. (in Chinese with English abstract)
- [3] 陈青云, 汪政富. 节能型日光温室热环境的动态模拟[J]. 中国农业大学学报, 1996, 1(1): 67-72.
Chen Qingyun, Wang Zhengfu. Dynamic simulation of sun-light greenhouse thermal environment[J]. Journal of China Agricultural University, 1996, 1(1): 67-72. (in Chinese with English abstract)
- [4] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(5): 191-196. (in Chinese with English abstract)
- [5] 李树海, 马承伟, 张俊芳, 等. 多层覆盖连栋温室热环境模型构建[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 217-220.
Li Shuhai, Ma Chengwei, Zhang Junfang, et al. Thermal model of multi-span greenhouses with multi-layer covers[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(3): 217-220. (in Chinese with English abstract)
- [6] 胥芳, 张立彬, 陈教科, 等. 玻璃温室小气候温湿度动态模型的建立与仿真[J]. 农业机械学报, 2005, 36(11): 102-105, 131.
Xu Fang, Zhang Libin, Chen Jiaoliao, et al. Modeling and simulation of subtropical greenhouse microclimate in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(11): 102-105, 131. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李小芳. 日光温室的热环境数学模拟及其结构优化[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.

- Li Xiaofang. Simulation of Thermal Environment and Structural Optimization for Sunlight Greenhouse[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [8] 李惟毅, 李兆力, 雷海燕, 等. 农业温室微气候研究综述与理论模型分析[J]. 农业机械学报, 2005, 36(5): 137—140.
- Li Weiyi, Li Zhaoli, Lei Haiyan, et al. Research on agricultural greenhouse microclimate and analysis of theoretical model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(5): 137—140. (in Chinese with English abstract)
- [9] 辛本胜, 乔晓军, 滕光辉. 日光温室环境预测模型构建[J]. 农机化研究, 2006(4): 96—100.
- Xin Bensheng, Qiao Xiaojun, Teng Guanghui. Forecasting environment model of sunlight greenhouse based on thermal balance[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006(4): 96—100. (in Chinese with English abstract)
- [10] 吴春艳, 赵新平, 郭文利. 日光温室作物热环境模拟及分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 190—195.
- Wu Chunyan, Zhao Xinping, Guo Wenli. Simulation and analysis of the temperature inside the sunlight greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(4): 190—195. (in Chinese with English abstract)
- [11] 孟力力, 杨其长, Gerard P A Bot, 等. 日光温室热环境模拟模型的构建[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 164—170.
- Meng Lili, Yang Qichang, Gerard P A Bot, et al. Visual simulation model for thermal environment in Chinese solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(1): 164—170. (in Chinese with English abstract)
- [12] 何芬, 马承伟, 张俊雄. 温室湿度动态预测模型建立与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 173—177.
- He Fen, Ma Chengwei, Zhang Junxiong. Dynamic forecasting model of humidity in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 173—177. (in Chinese with English abstract)
- [13] Tong G, Christopher D M, B Li. Numerical modeling of temperature variations in a Chinese solar greenhouse[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 68(1): 129—139.
- [14] 马承伟, 陆海, 李睿, 等. 日光温室墙体传热的一维差分模型与数值模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 231—237.
- Ma Chengwei, Lu Hai, Li Rui, et al. One-dimensional Finite difference model and numerical simulation for heat transfer of wall in Chinese solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(6): 231—237. (in Chinese with English abstract)
- [15] 郭正昊. 北方地区日光温室生态动力学研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- Guo Zhenghao. Research on Ecological Dynamics in Sunlight Greenhouse of Northern Areas[D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [16] 马承伟, 韩静静, 李睿. 日光温室热环境模拟预测软件研究开发[J]. 北方园艺, 2010(15): 69—75.
- Ma Chengwei, Han Jingjing, Li Rui. Research and development of software for thermal environmental simulation and prediction in solar greenhouse[J]. Northern Horticulture, 2010(15): 69—75. (in Chinese with English abstract)
- [17] Efrén Fitz-Rodríguez, Chieri Kubota, Gene A Giacomelli, et al. Dynamic modeling and simulation of greenhouse environments under several scenarios: A web-based application[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 70(1): 105—116.
- [18] Javier Leal Iga, Jorge Leal Iga, Carlos Leal Iga, et al. Effect of air density variations on greenhouse temperature model[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2008, 47(9/10): 855—867.
- [19] Bennis N, Duplaix J, Enéa G, et al. Greenhouse climate modelling and robust control[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 61(2): 96—107.
- [20] Wendy S Parker. Predicting weather and climate: Uncertainty, ensembles and probability[J]. Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics, 2010, 41(3): 263—272.
- [21] Impron I, hemming S, Bot G P A. Simple greenhouse climate model as a design tool for greenhouses in tropical lowland[J]. Biosystems Engineering, 2007, 98(1): 79—89.
- [22] 李建兴, 袁哲宁, 涂光备. 供暖能耗计算中非逐时室外温度的简化处理[J]. 煤气与热力, 2004, 24(8): 435—437.
- Li Jianxing, Yuan Zhening, Tu Guangbei. Simplification handling of non-hourly outdoor temperature in heating energy consumption calculation[J]. Gas and Heat, 2004, 24(8): 435—437. (in Chinese with English abstract)
- [23] 郎四维. 建筑能耗分析逐时气象资料的开发研究[J]. 暖通空调, 2002, 32(4): 1—5.
- Lang Siwei. Research and development of weather data for building energy analyses[J]. Journal of Heating, Ventilating and Air Conditioning, 2002, 32(4): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [24] 李百战, 田胜元. 用样条函数构成室外逐时温度的插值方法及其误差估计[J]. 重庆建筑工程学院学报, 1990, 12(2): 24—30.
- Li Baizhan, Tian Shengyuan. The method of forming hourly outdoor temperature by spline functions and analysis of errors[J]. Journal of Chongqing Architecture University, 1990, 12(2): 24—30. (in Chinese with English abstract)

- [25] 周卿, 苏华. 建筑能耗分析用逐时干球温度的插值方法[J]. 制冷与空调, 2006(1): 47—49.
Zhou Qing, Su Hua. The interpolation methods of hourly dry-bulb temperature data for building energy analyses[J]. Refrigeration and Air-Condition, 2006(1): 47—49. (in Chinese with English abstract)
- [26] Abdel-Aal R E. Hourly temperature forecasting using abductive networks[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2004, 17(5): 543—556.
- [27] GB 50019-2003, 采暖通风与空气调节设计规范[S].
- [28] 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: 19—20.

Daily change and math-expression method of outside temperature in winter for greenhouse environmental analysis

Xu Fan, Ma Chengwei^{*}

(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)

Abstract: Hourly, outdoor meteorological data are essential for the accurate dynamic simulation and analysis of the greenhouse thermal environment. Most meteorological stations have only published the four times (six/eight times) observation results, but hourly data have always been considered as classified files and not published. Also not published is the continuous observation temperature data in research or production, which should be included in the change principle and in greenhouse environment analysis. In this paper, we examined the daily change rule of outside air temperature in January for greenhouse environment analysis. According to observation data from 2009 to 2011, measured and recorded by the thermal recorder RS-12, we acquired the temperature data of each 10 min interval from 14 stations in North China. For each station, we adjusted the data to reflect true solar time, and using the hourly temperature at the true solar hourly time, we calculated the hourly temperature changing coefficient β . We then analyzed the hourly change of outside temperature in five provinces of North China for the month of January, and summarized a mathematical method for hourly air temperature by using β when the daily maximum and minimum temperature were known.

The results showed: In the same province, although the measured temperature is quite different in various years, β is always on the similar change trend and value at the same hour, so the outside temperature daily change can be described by the same coefficient in each province. By comparing β of the five provinces in North China, we found that β are similar, and R^2 reached 0.9704, so we can also show the hourly change of outside temperature by the same β . Based on the results above, we summed the hourly changing coefficient (1-24h) of outside temperature in January in North China. When we contrasted β with heating ventilation and air conditioning (HVAC), the two curves were different in minimum value time and rise/fall speed, which is related to seasons. The values of the outside air temperature hourly were changing coefficient β from 1 to 24h is -0.35, -0.37, -0.40, -0.44, -0.46, -0.48, -0.50, -0.39, -0.09, 0.12, 0.28, 0.39, 0.46, 0.50, 0.49, 0.41, 0.20, 0.02, -0.08, -0.15, -0.19, -0.24, -0.27, -0.31, respectively. The winter coefficient was examined by Xinkaikou Town in Tianjin in January of 2011, and Tongzhou District in Beijing in January of 2012. The simulation results of hourly air temperature outside by this method were similar to the actual measurements, the R^2 all reached 0.98, and average error were all 0.3°C. On this basis, using the Fourier series expansion, we stated a mathematical expression for calculating outside temperature at any time. According to the daily maximum and minimum temperature outside, we could determine the outside temperature at any time and provide full outdoor temperature data for greenhouse environment simulations accurately.

Key words: greenhouses, temperature, Fourier series, outside hourly air temperature, temperature hourly changing coefficient, environmental analysis