

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.12.038

# 北方干寒地区日光温室 CO<sub>2</sub> 预测模型建立与冬季试验\*

毕玉革 麻硕士 崔红梅 朱军

(内蒙古农业大学机电工程学院, 呼和浩特 010018)

**【摘要】** 根据质量平衡原理,构建了适用于北方干旱、寒冷地区典型日光温室 CO<sub>2</sub> 动态预测模型。模型定量描述了作物光合和呼吸作用、土壤呼吸作用、CO<sub>2</sub>施肥、自然通风及闭膜后的冷风渗透对室内空气中 CO<sub>2</sub> 的动态影响过程。利用内蒙古农牧业科技园区的日光温室对模型进行了冬季验证。结果表明,模型能较好地预测北方干旱、寒冷地区冬季晴天、多云天气的日光温室室内空气中 CO<sub>2</sub> 浓度的动态变化过程,且预测值和实测值之间的相对误差小于 10%。

**关键词:** 北方干寒地区 日光温室 二氧化碳 预测模型

**中图分类号:** S625.5<sup>+</sup>1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)12-0183-07

## Forecasting Model of CO<sub>2</sub> Concentration of Solar Greenhouse in the Northern Drought Cold Area and Experimental Verification in Winter

Bi Yuge Ma Shuoshi Cui Hongmei Zhu Jun

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

### Abstract

Based on the principle of mass balance, a dynamic forecasting model of CO<sub>2</sub> concentration of sunlight greenhouse in the northern drought cold area was established. The influenced factors correlative with CO<sub>2</sub> concentration changing such as crop photosynthesis and respiration, soil respiration, carbon dioxide supply and natural or winded of closed situation ventilation were established in the model. To validate the correctness of the model, an experiment was carried out in a sunlight greenhouse in Agricultural Science and Technology Park in Inner Mongolia. The results showed that the inner forecasted CO<sub>2</sub> concentration was well consistent with the measured data under the condition of sunny or cloudy day in the northern drought cold area in winter, and the relative error was less than 10%.

**Key words** Northern drought cold area, Solar greenhouse, Carbon dioxide, Forecasting mode

### 引言

CO<sub>2</sub>是作物光合作用的主要原料之一,对增加作物产量起着非常重要的作用。日光温室内 CO<sub>2</sub> 直接影响作物光合作用速率,因此 CO<sub>2</sub> 是日光温室环境监控的一个重要参数。在北方干旱、寒冷地区的日光温室,冬季最冷的 1 月份室外最低温度常低于 -15℃,室内外温差大,为保温并节省能源消耗,温

室几乎全天处于闭膜状态,在白昼的光合作用时期消耗室内大量的 CO<sub>2</sub>,使其浓度降低。由于不通风,室外 CO<sub>2</sub> 很难补给室内,再加上多数温室不具有 CO<sub>2</sub> 施肥条件,CO<sub>2</sub> 供需矛盾突出。作物光合作用适宜的 CO<sub>2</sub> 体积比一般在 1 000 μmol/mol,而通过冬季试验监测数据发现室内空气中的 CO<sub>2</sub> 大大低于这一数值,CO<sub>2</sub> 严重供需不足。

北方干旱、寒冷地区的日光温室 CO<sub>2</sub> 动态预测

收稿日期: 2010-01-10 修回日期: 2010-05-07

\* 2008 年内蒙古自治区预算内基本建设农口重点项目(内发改农字(2008)1715 号)

**作者简介:** 毕玉革,讲师,博士生,主要从事农业电气化与信息化研究, E-mail: biyuge163@163.com

**通讯作者:** 麻硕士,教授,博士生导师,主要从事农业电气化与信息化研究, E-mail: mashuoshi@imau.edu.cn

模型可以预测每日室内 CO<sub>2</sub> 随时间的变化趋势,为主动调节室内 CO<sub>2</sub> 环境提供科学依据,为作物生长提供最佳的 CO<sub>2</sub> 环境。

本文选择典型地区典型结构的日光温室为研究对象,对模型的预测效果进行冬季试验验证。

## 1 模型构建

如图 1 所示,日光温室内空气中 CO<sub>2</sub> 质量传递过程主要有作物冠层光合与呼吸作用从空气中吸收 CO<sub>2</sub> 质量流量  $\Phi_{a-c-CO_2}$ 、土壤呼吸作用向空气中释放 CO<sub>2</sub> 质量流量  $\Phi_{s-a-CO_2}$ 、自然通风换气和冷风渗透泄漏 CO<sub>2</sub> 质量流量  $\Phi_{a-o-CO_2}$  与 CO<sub>2</sub> 施肥质量流量  $\Phi_{add-CO_2}$  几个方面,在保持质量平衡的状态下,使得 CO<sub>2</sub> 随时间变化。

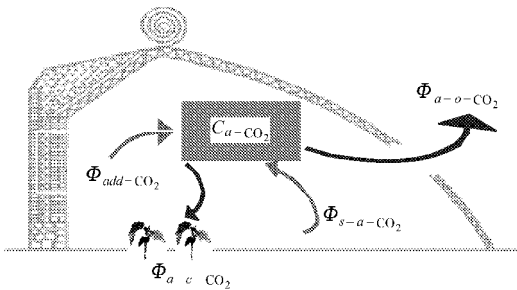


图 1 日光温室内 CO<sub>2</sub> 质量传递示意图

Fig. 1 Sketch of CO<sub>2</sub> mass transpiration in solar greenhouse

根据传热学的质量平衡原理,列出日光温室内 CO<sub>2</sub> 动态平衡微分方程

$$\frac{dC_{a-CO_2}}{dt} = \frac{\Phi_{add-CO_2} + \Phi_{s-a-CO_2} - \Phi_{a-c-CO_2} - \Phi_{a-o-CO_2}}{V_a} \quad (1)$$

式中  $C_{a-CO_2}$  ——温室内空气 CO<sub>2</sub> 密度

$V_a$  ——日光温室内空气体积

### 1.1 作物光合与呼吸作用的 CO<sub>2</sub> 质量流量

$\Phi_{a-c-CO_2}$

光合作用过程是 CO<sub>2</sub> 和水的同化过程,衡量指标是光合作用速率。作物光合作用速率大小主要受到达作物冠层的光照度、空气中的 CO<sub>2</sub> 和冠层温度的影响,随着冠层辐射量、CO<sub>2</sub> 和冠层温度的增加而增加,达到最大值后又会随着冠层温度的升高而下降。

模拟光合作用的模型有很多,它们以不同方式描述了这一过程。本文基于 Farquhar 等的叶片光合作用模型<sup>[1]</sup> 和 Goudriaan 等的作物光合作用模型<sup>[2-4]</sup> 构建北方干寒地区典型结构的日光温室内作物光合作用模型:

作物光合与呼吸作用吸收 CO<sub>2</sub> 质量流量为

$$\Phi_{a-c-CO_2} = P_{cg} - r_c \quad (2)$$

其中

$$P_{cg} = 10^{-6} A_s P_g \quad (3)$$

$$r_c = 10^{-6} A_s r_D \quad (4)$$

式中  $P_{cg}$  ——作物冠层同化速率 CO<sub>2</sub> 质量流量, kg/s

$r_c$  ——作物冠层暗呼吸速率 CO<sub>2</sub> 质量流量, kg/s

$P_g$  ——作物冠层总同化速率, mg/(m<sup>2</sup>·s)

$A_s$  ——日光温室内土壤面积, m<sup>2</sup>

$r_D$  ——作物冠层暗呼吸速率, mg/(m<sup>2</sup>·s)

$$P_g = P_{g-L} L_{AI} \quad (5)$$

$$r_D = M_{CO_2} r_{D-ul} L_{AI} \quad (6)$$

其中

$$P_{g-L} = P_{gmax} (1 - e^{-\frac{\varepsilon I_A}{P_{gmax}}}) \quad (7)$$

式中  $P_{g-L}$  ——叶子的同化速率, mg/(m<sup>2</sup>·s)

$L_{AI}$  ——作物的叶面积指数

$M_{CO_2}$  ——CO<sub>2</sub> 摩尔质量, 取 44 g/mol

$r_{D-ul}$  ——叶子的暗呼吸速率, μmol/(m<sup>2</sup>·s)

$P_{gmax}$  ——叶子的最大同化速率, mg/(m<sup>2</sup>·s)

$\varepsilon$  ——叶子光呼吸作用的光利用率, mg/J

$I_A$  ——叶子吸收的太阳短波辐射通量<sup>[5]</sup>, W/m<sup>2</sup>

$$I_A = I_{c-s} e^{-\mu L_{AI}} \quad (8)$$

$$\varepsilon = \Psi \frac{M_{CO_2} \max(C_{CO_2a}, \Gamma) - \Gamma}{4 \max(C_{CO_2a}, \Gamma) + 2\Gamma} \quad (9)$$

其中

$$C_{CO_2a} = \frac{C_{a-CO_2}}{1.83 \times 10^{-6}} \quad (10)$$

$$\Gamma = 44.1 e^{10 \frac{T_c - 298}{T_c}} \quad (11)$$

式中

$\Psi$  ——从 J 到 μmol 转换因子, 取 1.61 μmol/J

$\Gamma$  ——缺暗呼吸作用的 CO<sub>2</sub> 补偿体积比, μmol/mol

$C_{CO_2a}$  ——日光温室内 CO<sub>2</sub> 体积比, μmol/mol

$I_{c-s}$  ——到达作物冠层的太阳辐射通量<sup>[6]</sup>, W/m<sup>2</sup>

$\mu$  ——作物消光系数, 取 0.43

$T_c$  ——作物冠层叶面温度, K

叶子的最大总同化速率  $P_{gmax}$  是由叶子的最大净同化速率和暗呼吸速率共同决定的, 即

$$P_{gmax} = P_{nmax} + M_{CO_2} r_{D-ul} \quad (12)$$

其中  $r_{D-ul} = \begin{cases} 1.1 e^{\frac{26.8(T_c - 273)}{T_c}} & (\text{光合作用初始 } 1 \sim 2 \text{ h}) \\ 1.1 e^{\frac{26.8(T_c - 298)}{T_c}} & (\text{光合作用其他时间}) \end{cases} \quad (13)$

式中  $P_{nmax}$  ——叶子最大净同化速率, mg/(m<sup>2</sup>·s)

叶子的最大净同化速率为

$$P_{nmax} = \frac{P_{mm} + P_{nc} - \sqrt{(P_{mm} + P_{nc})^2 - 4\Theta P_{mm} P_{nc}}}{2\Theta} \quad (14)$$

其中  $P_{mm} = \frac{M_{CO_2} J_{max}}{4}$  (15)

$$P_{nc} = \frac{540.54}{T_c R_{tot-CO_2}} (\max(C_{CO_2a}, \Gamma) - \Gamma) \quad (16)$$

$$J_{max} = J_{max25} e^{\frac{15(T_c - 298)}{T_c}} \frac{1}{1 + e^{\frac{710(T_c - 220000)}{8.314T_c}}} \quad (17)$$

式中  $\Theta$ ——曲度, 取 0.7

$P_{mm}$ ——最大内源性光合速率, mg/(m<sup>2</sup>·s)

$P_{nc}$ ——净光合作用的 CO<sub>2</sub> 速率, mg/(m<sup>2</sup>·s)

$R_{tot-CO_2}$ ——CO<sub>2</sub> 从空气中向叶绿体扩散总阻力, 计算获得或取为 740 s/m<sup>[7]</sup>

$J_{max}$ ——最大电子转移率, μmol/(m<sup>2</sup>·s)

$J_{max25}$ ——在 25℃ 最大电子转移率, 取 210 μmol/(m<sup>2</sup>·s)<sup>[2]</sup>

$$R_{tot-CO_2} = R_{s-CO_2} + R_{b-CO_2} + R_{c-CO_2} \quad (18)$$

式中  $R_{s-CO_2}$ ——叶片气孔对 CO<sub>2</sub> 扩散阻力, s/m

$R_{b-CO_2}$ ——叶片边界层对 CO<sub>2</sub> 扩散阻力, s/m

$R_{c-CO_2}$ ——作物冠层光、碳循环中的羧化作用阻力, s/m

$$R_{c-CO_2} = \frac{K_m 540.54}{V_{Cmax} T_c M_{CO_2}} \quad (19)$$

其中  $K_m = 310 e^{\frac{24(T_c - 298)}{T_c}} (1 + 1.35 e^{\frac{14.5(T_c - 298)}{T_c}})$  (20)

$$V_{Cmax} = 98 e^{\frac{23.6(T_c - 298)}{T_c}} \quad (21)$$

式中  $K_m$ ——羧化作用的 Michaelis Menten 常数

$V_{Cmax}$ ——最大羧化作用速率, μmol/(m<sup>2</sup>·s)

气孔和边界层对 CO<sub>2</sub> 的扩散阻力  $R_{s-CO_2}$ 、 $R_{b-CO_2}$  可以根据 Stanghellini (1987) 定义的作物蒸腾模型由气孔和边界层对水分子的扩散阻力求出<sup>[6,8-9]</sup>

$$R_{s-CO_2} = 1.6 R_{s-H_2O} \quad (22)$$

$$R_{b-CO_2} = 1.37 R_{b-H_2O} \quad (23)$$

其中  $R_{b-H_2O} = Le^{\frac{2}{3}} R_{b-heat}$  (24)

$$R_{s-H_2O} = R_{min} f_l f_{T_c} f_{CO_2} f_{H_2O} \quad (25)$$

式中  $R_{s-H_2O}$ ——叶片气孔对水分子扩散阻力, s/m

$R_{b-H_2O}$ ——叶片边界层对水分子扩散阻力, s/m

$Le$ ——空气中水蒸气的 Lewis 数, 取 0.89

$R_{b-heat}$ ——叶片边界层对流换热阻力, s/m

$R_{min}$ ——叶片气孔最小水扩散阻力, 取 82.003 s/m<sup>[10]</sup>

$f_l$ ——太阳辐射相关系数

$f_{T_c}$ ——作物冠层温度相关系数

$f_{CO_2}$ ——CO<sub>2</sub> 相关系数, 计算或取 0.035<sup>[11]</sup>

$f_{H_2O}$ ——作物湿度相关系数, 计算或取 4<sup>[11]</sup>

$$R_{b-heat} = \frac{1174 \sqrt{l_f}}{(l_f |T_c - T_a| + 2.7v_a^2)^{\frac{1}{4}}} \quad (26)$$

$$f_l = \frac{\frac{I_{c-s}}{2L_{AI}} + 4.3}{\frac{I_{c-s}}{2L_{AI}} + 0.54} \quad (27)$$

$$f_{T_c} = \begin{cases} 1 + 0.5 \times 10^{-2} (T_c - T_0 - 33.6)^2 & (I_{c-s} \leq 3) \\ 1 + 2.3 \times 10^{-2} (T_c - T_0 - 24.5)^2 & (I_{c-s} > 3) \end{cases} \quad (28)$$

$$f_{CO_2} =$$

$$\begin{cases} 1 & (I_{c-s} \leq 3) \\ 1 + 6.08 \times 10^{-7} (C_{CO_2a} - 200)^2 & (I_{c-s} > 3) \\ 1.49 & (C_{CO_2a} \geq 1100) \end{cases} \quad (29)$$

$$f_{H_2O} = \frac{4}{\sqrt{1 + 255e^{-54.27\Delta p_{c-H_2O}}}} \quad (30)$$

式中  $l_f$ ——叶片特性宽度, m

$T_a$ ——室内空气温度, K

$v_a$ ——室内风速, 可取为 0.09<sup>[10]</sup>, m/s

$T_0$ ——绝对温度, 取 273.15, K

$\Delta p_{c-H_2O}$ ——作物冠层的饱和赤字, Pa

叶片气孔对水分子的扩散阻力中各相关系数变化范围<sup>[9]</sup>为: 当到达作物冠层的太阳辐射通量  $I_{c-s}$  从 0 增加到 100 W/m<sup>2</sup> 时, 系数  $f_l$  从 8 迅速降到 1, 之后几乎不变。作物冠层温度相关系数  $f_{T_c}$  在  $T_c$  值为 24.5℃ 时取最小值 1, 当  $T_c$  从 7.5℃ 升到 24.5℃, 再从 24.5℃ 继续升到 50℃ 过程中,  $f_{T_c}$  从 8 降到最小值 1, 再从 1 升到 8。当 CO<sub>2</sub> 在 0 ~ 600 μmol/mol 范围内变化时, 作物冠层 CO<sub>2</sub> 相关系数  $f_{CO_2} \approx 1$ , 当 CO<sub>2</sub> 在 600 ~ 1200 μmol/mol 范围内变化时,  $f_{CO_2}$  从 1 缓慢增加到 1.5。当作物冠层饱和赤字  $\Delta p_{c-H_2O}$  从 0 增加到 15 时, 作物冠层湿度相关系数  $f_{H_2O}$  从 1 增加到 4, 之后保持不变, 系数可根据其变化范围取经验值。

气孔和边界层对 CO<sub>2</sub> 的扩散阻力  $R_{s-CO_2}$ 、 $R_{b-CO_2}$  也可根据其变化范围取经验值。 $R_{s-CO_2}$  受到作物冠层温度  $T_c$ 、室内空气中 CO<sub>2</sub> 的体积比  $C_{CO_2a}$ 、到达作物冠层的太阳辐射通量  $I_{c-s}$  和室内相对湿度  $R_{Ha}$  的影响。而  $R_{b-CO_2}$  受室内风速  $v_a$ 、室内空气温度与作物冠层温度差  $|T_c - T_a|$  和叶片特性宽度  $l_f$  的影响。根据 Stanghellini (1987) 研究成果<sup>[9]</sup>,  $R_{s-CO_2}$  的变化是随 CO<sub>2</sub> 的增大而缓慢增大, 随到达作物冠层的太阳辐射通量的增大而缓慢减小, 随室内相对湿度的

增大而增大。假定  $R_{Ha}$ 、 $I_{c-s}$ 、 $T_c$ 、 $C_{CO_2a}$  取值范围为 (80% ~ 95%)、(100 ~ 500 W/m<sup>2</sup>)、(10 ~ 50℃)、(200 ~ 1 000 μmol/mol), 则气孔对 CO<sub>2</sub> 的扩散阻力  $R_{s-CO_2}$  在最小值 301 s/m 到最大值 13 568 s/m 之间变化。 $R_{b-CO_2}$  随室内风速的增大而减小, 随  $|T_c - T_a|$  增大而减小, 随  $l_f$  增大而增大。假定  $v_a = 0.09$  m/s、 $l_f = 0.035$  m、 $|T_c - T_a|$  在 0 ~ 2℃ 之间变化, 则边界层对 CO<sub>2</sub> 的扩散阻力  $R_{b-CO_2}$  在 245 s/m 到 242 s/m 内变化。

## 1.2 自然通风、冷风渗透的 CO<sub>2</sub> 质量流量 $\Phi_{a-o-CO_2}$

$$\Phi_{a-o-CO_2} = \varphi_{a-o} (C_{a-CO_2} - C_{o-CO_2}) \quad (31)$$

其中  $\varphi_{a-o} = \varphi_{win} + \varphi_{leak}$  (32)

$$\varphi_{leak} = \frac{(0.2 - 0.5) V_a}{3\ 600} \quad (33)$$

式中  $C_{o-CO_2}$ ——室外大气 CO<sub>2</sub> 密度, 取  $658.8 \times 10^{-6}$  kg/m<sup>3</sup>

$\varphi_{a-o}$ ——日光温室开窗或揭开膜等借助“热压”或“风压”促使空气流动的自然通风流量与闭膜时日光温室结构造成的冷风渗透量的和, m<sup>3</sup>/s

$\varphi_{win}$ ——自然通风流量, m<sup>3</sup>/s

$\varphi_{leak}$ ——闭膜后的冷风渗透流量, m<sup>3</sup>/s

北方干旱、寒冷地区, 冬季冷风渗透量  $\varphi_{leak}$  受室外风速的影响比较大, 当室外风速低于 0.3 m/s 时,  $\varphi_{leak}$  取最小值; 当风速介于 0.3 ~ 1 m/s 时,  $\varphi_{leak}$  取中间值; 当风速介于 1 ~ 2 m/s 时,  $\varphi_{leak}$  取较大值; 当风速高于 2 m/s 时,  $\varphi_{leak}$  取最大值。

引用周长吉关于温室自然通风量的计算方法<sup>[12]</sup> 计算单独热压作用、单独风压作用和热压与风压共同作用的  $\varphi_{win}$  值。

## 1.3 CO<sub>2</sub> 施肥的 CO<sub>2</sub> 质量流量 $\Phi_{add-CO_2}$

施肥模型为

$$\Phi_{add-CO_2} = u_{pCO_2} \Phi_{CO_2\max} \quad (34)$$

式中  $u_{pCO_2}$ ——CO<sub>2</sub> 施肥控制系数, [0, 1] 区间取值  
 $\Phi_{CO_2\max}$ ——CO<sub>2</sub> 施肥最大质量流量, kg/s

国内日光温室的 CO<sub>2</sub> 施肥方案很多<sup>[13]</sup>, 方案与模型之间的转换关系为: 根据实施方案, 释放 CO<sub>2</sub> 最大功率与最大质量流量  $\Phi_{CO_2\max}$  对应, 可控范围应转换成系数  $u_{pCO_2}$  的值。

## 1.4 土壤呼吸作用的 CO<sub>2</sub> 质量流量 $\Phi_{s-a-CO_2}$

影响土壤呼吸作用的主要因素是土壤温度, 还有很多其他因素。比如土壤若是有机质, 则温湿度条件适宜时, 土壤中的生物活性加强, 土壤呼吸作用相应地加强。土壤温度影响符合幂指数规律<sup>[7, 14]</sup>, 其他因素引进一个系数来修正。模型为

$$\Phi_{s-a-CO_2} = 3^{0.1t_s} \lambda A_s p_s(0) \quad (35)$$

式中  $\lambda$ ——修正系数, 一般土壤  $\lambda = 1$ , 有机质土壤, 根据试验获取合适的值

$p_s(0)$ ——土壤 0℃ 时释放 CO<sub>2</sub> 量, 取常数  
 $10^{-8}$  kg/(m<sup>2</sup>·s)

$t_s$ ——室内表层土壤温度, ℃

## 2 模型求解

Matlab 编程, 代入已知条件, 并以每日空气 CO<sub>2</sub> 固定时间的一个实测数据为初始值, 运行程序就可获得每日室内 CO<sub>2</sub> 浓度小时预测值。

### 2.1 模型简化

为能编程求解模型, 将室内空气中 CO<sub>2</sub> 浓度质量平衡微分方程式(1)变为推移式

$$\frac{C_{a-CO_2-(i+1)} - C_{a-CO_2-i}}{\Delta t} = \frac{\Phi_{add-CO_2} + \Phi_{s-a-CO_2} - \Phi_{a-c-CO_2} - \Phi_{a-o-CO_2}}{V_a}$$

式中  $\Delta t$ ——时间步长, 取为 1 h

### 2.2 已知条件

预测模型的已知条件就是利用陈青云、李元哲<sup>[15~19]</sup> 等关于日光温室热环境模型的研究成功预测出的室内空气温度、作物冠层温度、表层土壤温度等参数的动态变化过程, 利用陈青云、刘洪<sup>[5, 20~22]</sup> 等的日光温室光环境模型研究成果成功预测出到达室内作物冠层的太阳辐射量。

### 2.3 模型输出结果转换

模型输出值  $C_{a-H_2O}$  单位 kg/m<sup>3</sup> 转换为  $C_{CO_2a}$  单位 μmol/mol, 与 CO<sub>2</sub> 传感器实测数据单位匹配, 以便验证模型。

## 3 试验

选取内蒙古农牧业科技园区(位于包头市土默特右旗)的一栋日光温室为试验温室, 东经 110.5°, 北纬 40.5°, 南北走向, 方位角 0°, 长度 50 m, 跨度 6.5 m, 前屋面斜面长 6 m, 走道宽 0.5 m, 脊高 3.5 m, 后墙高 2.12 m, 后坡斜面 1.2 m。透光膜为 3 层复合聚乙烯膜, 无顶窗。

试验时间为 2009 年 11 月 23 日至 2010 年 2 月 28 日, 通常 9:00 揭开保温被, 16:00 盖上。观察发现, 冬季晴天太阳是洒满地面的。为保温, 冬季处于全闭膜状态, 这样只有冷风渗透泄漏 CO<sub>2</sub> 质量流量, 试验温室没有 CO<sub>2</sub> 施肥设施。2009 年 11 月 23 日室内移植紫叶生菜幼苗。12 月 28 日, 室内再次移植紫叶生菜幼苗, 有机土壤培植。

### 3.1 试验方案

为验证模型,模型程序中的表层土壤温度、作物冠层温度和光照度、室外风速参数均代入实测值,为此布置日光温室 CO<sub>2</sub> 监测系统,如图 2 所示。选用 DAVIS 气象站,DAVIS 全光谱农用光照传感器、日本 Toky-100 型温度传感器、美国 (Telaire) CO<sub>2</sub> 传感器。所有传感器连接 Auto-22 数据采集器,数据采集器每隔 10 min 采集、存储一次数据。通过 RS-485 总线与计算机连接,将数据以 XLS 文件存入计算机。

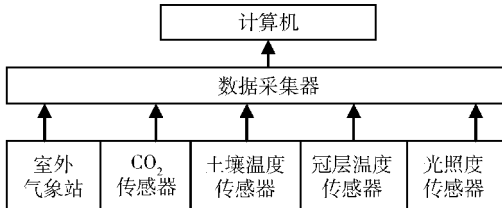


图 2 日光温室环境监测系统

Fig. 2 Monitoring system in solar greenhouse

### 3.2 数据处理

用 2009 年 11 月 23 ~ 26 日、2010 年 1 月 3 ~ 6 日、2 月 1 ~ 4 日作为模型验证时间,试验期间叶面积指数  $L_{AI}$  分别为 0.3, 0.3, 2, 天气情况如表 1 所示。首先,将日光温室内到达作物冠层的光照度、冠层温度、表层土壤温度、室外风速的实测值取小时平均值,此处给出 1 月 3 ~ 6 日的数据如图 3 所示。其次,给出 2010 年 1 月 3 ~ 6 日的预测模型程序中间输出结果,便于分析作物光合作用和呼吸作用、通风、土壤呼吸作用对 CO<sub>2</sub> 收支速率的影响。内容包括:室外风速变化引起冷风渗透量的不同对 CO<sub>2</sub> 收支速率的影响、土壤温度变化对 CO<sub>2</sub> 收支速率的影响和由于天气条件不同进入室内作物冠层的光照度变化引起作物光合速率和呼吸速率的不同对 CO<sub>2</sub> 收

表 1 试验日期天气情况

Tab. 1 Weather situation in experiment

日期	最高温度/°C	最低温度/°C	天气情况
11-23	2	-8	晴
11-24	2	-9	晴
11-25	3	-9	多云
11-26	-1	-10	晴
01-03	-5	-20	多云小雪
01-04	-11	-21	晴
01-05	-11	-20	晴
01-06	-9	-15	阴
02-01	-9	-22	晴
02-02	-4	-16	晴
02-03	-5	-16	晴
02-04	0	-12	晴

支速率的影响 3 项内容,如图 4 ~ 6 所示。最后,运行预测模型程序的输出预测值结果与实测值比较的处理如图 7 所示。

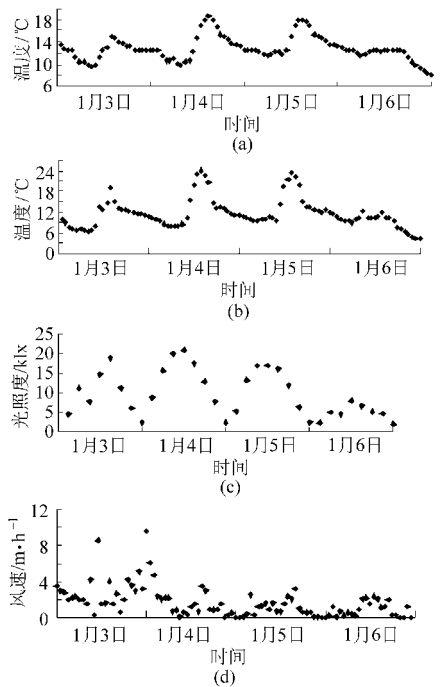


图 3 日光温室实测数据

Fig. 3 Testing data in solar greenhouse

(a) 表层土壤温度 (b) 作物冠层温度  
(c) 到达作物冠层的太阳短波辐射 (d) 室外风速

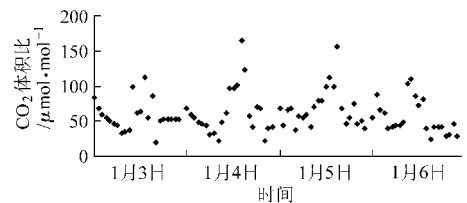


图 4 室外风速引起的 CO<sub>2</sub> 泄漏体积比  
(模型计算值未验证)

Fig. 4 CO<sub>2</sub> in condition of wind speed  
in the solar greenhouse

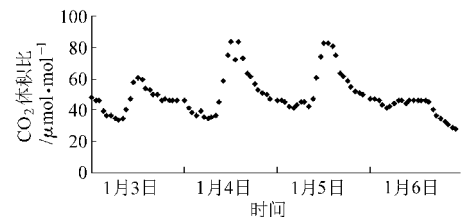


图 5 土壤呼吸作用释放的 CO<sub>2</sub> 体积比  
(模型计算值未验证)

Fig. 5 CO<sub>2</sub> in condition of soil respiration  
in the solar greenhouse

## 4 结果分析

用典型地区、典型日光温室对模型预测功能进行不同月份连续几日的试验验证,分析如下:

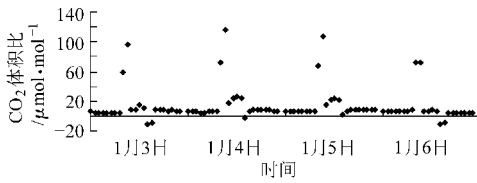


图6 作物光合与呼吸作用吸收  $\text{CO}_2$  体积比  
(模型计算值未验证)

Fig. 6  $\text{CO}_2$  in condition of crop photosynthesis and respiration in the solar greenhouse

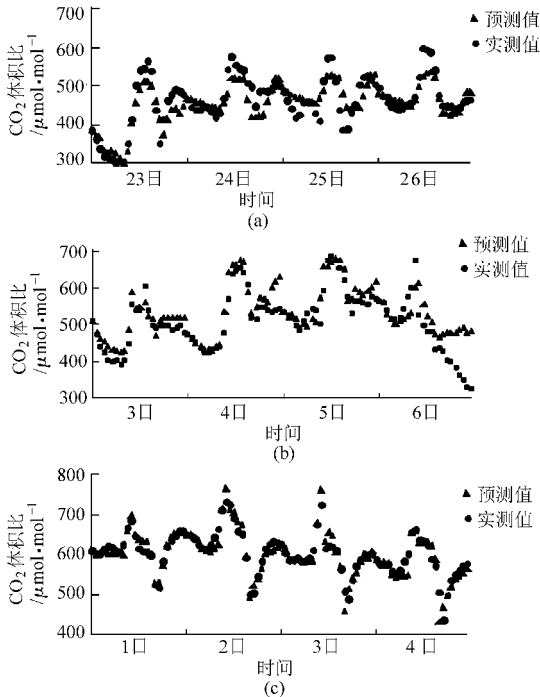


图7 日光温室内空气  $\text{CO}_2$  预测值与实测值比较图

Fig. 7 Forecasting and testing of  $\text{CO}_2$   
in the solar greenhouse

(a) 2009年11月23~26日(没有室外风速影响)

(b) 2010年1月3~6日 (c) 2010年2月1~4日

(1) 图7a是没有考虑室外风速的影响即冷风渗透量取小时固定值的结果,预测值与实测值之间误差比较大,而图7b,7c是加入了室外风速变化而得出的结果,预测值与实测值的误差比较小。为说明风速影响大小,根据1月3~6日的室外风速变化,如图3d所示,得出不同冷风渗透量的选择值单独向室外空气中泄漏的  $\text{CO}_2$  量值,如图4所示。随风速的加大,室内的  $\text{CO}_2$  泄漏量增多,说明室外风速

的变化对室内空气中  $\text{CO}_2$  的收支速率的影响比较大。

(2) 图5是1月3~6日土壤温度单一因素变化直接向室内空气中释放  $\text{CO}_2$  的量值图。对照图3a发现,随土壤温度的升高,土壤呼吸作用向室内空气中释放的  $\text{CO}_2$  量加大。

(3) 图6是1月3~6日光照度、作物冠层温度双因素对同化速率和呼吸速率的影响结果图。对照图3b和3c可以看出,白天,图6中9:00和10:00是作物光合、呼吸的开始阶段,随光照度的增强和冠层温度的迅速升高,光合、呼吸反应剧烈,共同作用的结果是释放大量的  $\text{CO}_2$ 。11:00之后进入稳定光合、呼吸作用阶段,随着光照度、作物冠层温度的增大,作物同化速率和呼吸速率都增大,共同作用的结果也是释放一定的  $\text{CO}_2$ 。这是由于1月3~6日的试验温室内种植的紫叶生菜处于幼苗期,光合作用时期其同化速率低于暗呼吸速率造成的。图6显示夜间作物向室内空气中释放的  $\text{CO}_2$  量非常少,说明作物几乎停止呼吸。这是由于1月3~6日是最冷时间,室内作物冠层温度很低,作物冠层温度对作物呼吸速率的影响变小。

(4) 综合图7可以看出,日光温室内  $\text{CO}_2$  模型计算的小时预测值与实测值两条曲线变化趋势基本一致。且图7b和7c显示,预测模型在晴天的预测值与实测值比较吻合,相对误差低于5%;预测模型在多云天气的预测值与实测值基本吻合,相对误差低于10%;而在阴天的预测值与实测值相差较大,相对误差超过20%。

## 5 结束语

全面分析了作物光合作用与呼吸作用、土壤呼吸作用、自然通风和闭膜后的冷风渗透、室外风速及采取  $\text{CO}_2$  施肥补偿措施影响室内空气中  $\text{CO}_2$  的动态因素的基础上,构建了北方干旱、寒冷地区典型结构的日光温室内空气  $\text{CO}_2$  动态预测模型。经过冬季试验验证,模型在晴天、多云天气是实用的,且相对误差小于10%。阴天时,由于作物光合作用弱,模型有待进一步修正。

## 参 考 文 献

- 1 Farquhar G D, on Caemmerer S, Berry J A. A biochemical model of photosynthetic  $\text{CO}_2$  assimilation in leaves of  $\text{C}_3$  species [J]. *Planta*, 1980, 149: 78 ~ 90.
- 2 Goudraan J, van Laar H H. Modelling potential crop growth process [M]. Dordrecht, Netherlands: Kluwer academic publishers, 1994.
- 3 Heuvelink. Tomato growth and yield: quantitative analysis and synthesis [D]. Wageningen Netherlands: Wageningen Agricultural University, 1996.

- 4 Korner O, Challa H, van Ooteghem R J C. Crop based climate regimes for energy saving in greenhouse cultivation [D]. Wageningen Netherlands: Wageningen University, 2003.
- 5 刘洪,郭文利,李慧君. 北京地区日光温室光环境模拟及分析[J]. 应用气象学报,2008,19(3):350~355.  
Liu Hong, Guo Wenli, Li Huijun. Simulation and analysis on light environment of greenhouse in Beijing area [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008,19(3):350~355. (in Chinese)
- 6 Bot P A. Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model [D]. Wageningen Netherlands: Wageningen Agricultural University, 1983.
- 7 董仁涛. 日光温室CO<sub>2</sub>浓度预测模型[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.  
Dong Rentao. Simulation model of CO<sub>2</sub> concentration in a sunlight greenhouse [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- 8 Monteith L, Unsworth M H. Principles of environmental physics [M]. London: Edward Arnold publishers, 1990.
- 9 Stanghellini C. Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management [D]. Wageningen Netherlands: Wageningen Agricultural University, 1987.
- 10 陈教科. 温室小气候建模及其智能控制研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2004.  
Chen Jiaoke. Research on the modeling and intelligent control of the greenhouse microclimate [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2004. (in Chinese)
- 11 van Ooteghem R J C. Optimal control design for a solar greenhouse [D]. Wageningen Wageningen University, 2007.
- 12 周长青. 温室工程设计手册 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 229~235.
- 13 杜中平. 日光温室CO<sub>2</sub>对蔬菜的影响及施肥技术[J]. 实用技术与科普, 2002(3): 51~52.
- 14 韩效钊, 梁玉龙, 徐超, 等. 温室CO<sub>2</sub>供需模型研究[J]. 农业系统科学与综合研究, 2006, 22(2): 150~153.  
Han Xiaozhao, Liang Yulong, Xu Chao, et al. The study of supply and demand model of carbon dioxide enrichment in greenhouse [J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2006, 22(2): 150~153. (in Chinese)
- 15 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)
- 16 李元哲, 吴德让, 于竹. 日光温室微气候的模拟与实验研究[J]. 农业工程学报, 1994, 10(1): 130~136.
- 17 吴飞青, 张立彬, 胥芳, 等. 机械通风条件下玻璃温室热环境数值模拟[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 153~158.  
Wu Feiqing, Zhang Libin, Xu Fang, et al. Numerical simulation of the thermal environment in a mechanically ventilated greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 153~158. (in Chinese)
- 18 孟力力. 基于VB和MATLAB的日光温室热环境模型构建于结构优化[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.  
Meng Lili. Thermal environment model in Chinese solar greenhouse based on VB and MATLAB and structure optimization [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Science, 2008. (in Chinese)
- 19 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 sunlight greenhouse [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- 20 陈青云. 单屋面温室光照环境的数值实验[J]. 农业工程学报, 1993, 9(3): 96~101.  
Chen Qingyun. Numerical experiments on direct light transmission of single roof greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 1993, 9(3): 96~101. (in Chinese)
- 21 孙忠富, 吴毅明, 曹永华, 等. 日光温室中直射光的计算机模拟方法——设施农业光环境模拟分析研究之三[J]. 农业工程学报, 1993, 9(1): 36~42.
- 22 孙忠富, 李佑祥, 吴毅明, 等. 北京地区典型日光温室直射光环境的模拟与分析——设施农业光环境模拟分析研究之四[J]. 农业工程学报, 1993, 9(2): 45~51.
- 23 程秀花, 毛罕平, 伍德林, 等. 玻璃温室自然通风热环境时空分布数值模拟[J]. 农业机械学报, 2009, 40(6): 179~183.  
Cheng Xiuhua, Mao Hanping, Wu Delin, et al. Numerical simulation of thermal profiles in spatial and temporal field for natural ventilated glasshouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6): 179~183. (in Chinese)
- 24 丁为民, 汪小昆, 李毅念, 等. 温室环境控制与温室模拟模型研究现状分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 162~168.  
Ding Weimin, Wang Xiaokun, Li Yinan, et al. Review on environmental control and simulation models for greenhouses [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 162~168. (in Chinese)