

# 中国天气发生器模拟非降水变量的效果评估<sup>\* 1</sup>

廖要明<sup>1,2</sup> 刘绿柳<sup>2</sup> 陈德亮<sup>3</sup> 谢云<sup>1</sup>

LIAO Yaoming<sup>1,2</sup> LIU Lülü<sup>2</sup> CHEN Deliang<sup>3</sup> XIE Yun<sup>1</sup>

1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室,地理学与遥感科学学院,北京,100875

2. 中国气象局气候研究开放实验室,国家气候中心,北京,100081

3. 瑞典哥德堡大学地球科学系,405 30 哥德堡,瑞典

1. *State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*

2. *Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, CMA, Beijing 100081, China*

3. *Department of Earth Sciences, University of Gothenburg 405 30 Gothenburg, Sweden*

2009-06-11 收稿,2009-11-09 改回.

**Liao Yaoming, Liu Lülü, Chen Deliang, Xie Yun. 2011. An evaluation of the BCC/RCG-WG's performance in simulating daily non-precipitation variables in China. *Acta Meteorologica Sinica*, 69(2):310-319**

**Abstract** The BCC/RCG-WG is a stochastic weather generator developed for simulating daily precipitations in China. In this study it is further developed by adopting a framework based on the Fourier series with multi-variables weak stationary process assumed for daily non-precipitation variables including maximum temperature, minimum temperature, sunshine hour, relative humidity and average wind speed. These non-precipitation variables are made dependent on the simulated precipitation by the previous version of the BCC/RCG-WG for daily precipitation. Using daily observations of the five non-precipitation variables from 1971 to 2000, the parameters for each non-precipitation variable of the further developed weather generator are determined for the 669 stations all over China. Based on the estimated parameters, daily non-precipitation variables at these stations for any period of time can be simulated. A 100 year simulation is made and compared with observations during 1971–2000 in terms of annual, monthly statistics and extreme climate events. The results of monthly and annual statistics are fairly satisfactory. Root mean square error (RMSE) of annual maximum temperature, minimum temperature, sunshine hour, relative humidity and average wind speed are 0.2°C, 0.2°C, 70.9 h, 0.6% and 0.2 m/s, respectively. The RMSEs of monthly maximum temperature, minimum temperature, sunshine hour, relative humidity and average wind speed are between 0.4–0.7°C, 0.4–0.7°C, 10–20 h, 4%–14% and 0.6–0.9 m/s, respectively. These demonstrate the usefulness of the weather generator BCC/RCG-WG for the five non-precipitation variables. However, simulations of extreme climate events are less satisfactory.

**Key words** Weather generator, BCC/RCG-WG, Maximum temperature, Minimum temperature, Sunshine hour, Relative humidity, Average wind speed, China

**摘要** 文中介绍了天气发生器 BCC/RCG-WG 基于谐波分析和多变量平稳过程对最高气温、最低气温、日照时数、相对湿度和平均风速等 5 个非降水变量的模拟模型,并根据中国 669 个站点 1971—2000 年的逐日气候资料(降水、最高气温、最低气温、日照时数、相对湿度和平均风速)计算了各站点的非降水变量的模拟参数。根据计算的模拟参数对中国各地逐日最高、最低气温和日照时数等非降水变量进行了模拟,并利用 100 年的逐日模拟结果和 1971—2000 年的实测资料对 5 个非降水变量在年、月平均值及极端值方面进行了比较。结果表明,BCC/RCG-WG 能较好地模拟中国各地的最高气温、最低气温、日照时

\* 资助课题:瑞典 STINT 基金会资助项目、国家自然科学基金资助项目(40575057)、中国气象局 2009 气象新技术推广重点项目“月动力模式与统计降尺度结合预测极端温度日数”。

作者简介:廖要明,主要从事气候降尺度技术和气候影响评价等科研、业务工作。E-mail: lymzxr@cma.gov.cn

数等 5 个非降水变量,特别是模拟年平均值的效果很好。模拟与实测的年平均最高气温和最低气温的均方根误差只有 0.2℃,年日照时数的均方根误差为 70.9 h,年平均相对湿度的均方根误差为 0.6%,年平均风速的均方根误差为 0.2 m/s。在月平均值方面,最高气温、最低气温和日照时数的模拟值与实测值也非常接近,但相对湿度和平均风速的模拟效果不是很理想。模拟和实测的各月平均最高气温、最低气温均方根误差在 0.4—0.7℃,各月平均日照时数均方根误差在 10—20 h,各月平均相对湿度均方根误差在 4%—14%,各月平均风速均方根误差在 0.6—0.9 m/s。对于诸如高温日数、极端最高、最低气温等极端气候事件,BCC/RCG-WG 的模拟效果相对较差。

**关键词** 天气发生器,最高气温,最低气温,日照时数,相对湿度,平均风速,中国  
**中图法分类号** P435

## 1 引言

天气发生器是研究一个地区天气或气候的一般特征,并根据这些统计特征生成该地区一年内逐日天气数据的随机模型(Benestad, et al, 2008)。天气发生器自问世以来,已广泛应用于作物、水文、土壤侵蚀、土地利用、社会经济系统等模拟模型(Bannayan, et al, 1999; 张岩等, 2006),生成逐日气候数据,进行气候条件的影响评价。近年来,天气发生器又被用于对全球气候模型的模拟结果进行降尺度处理(范丽军等, 2005; Wetterhall, et al, 2006; Lennartsson, et al, 2008),成为全球气候变化、极端气候事件发生及气候影响风险评估等研究的重要工具(Wilks, 1999; Semenov, et al, 2008; Chen, et al, 2008)。

天气发生器模拟的气候要素主要有降水、最高气温、最低气温、日照时数(或太阳辐射)等,其中降水的模拟是关键,最高气温、最低气温、日照时数等非降水变量的模拟以降水的变化特征为条件。对于逐日降水的模拟,包括降水发生的模拟和日降水量的模拟,其中降水发生(即干、湿日)的模拟,主要有两种基本的处理方法和相对应的统计模型:马尔可夫链方法和基于干日或湿日延续天数的半径经验分布的计算方法(Wilks, et al, 1999)。如果某天确定有降水发生(即湿日),那么日降水量就可以用概率分布函数来进行模拟;如果确定某天没有降水发生(即干日),则日降水量为 0。

最高气温、最低气温、日照时数等非降水变量的模拟一般来说都分干、湿两种状态分别进行。虽然在广泛被应用的 WGEN 等天气发生器中考虑干、湿状态对最低气温的影响不大,最低气温的模拟不分干、湿状态(Richardson, 1981)。但是, Hayhoe (1998)、Semenov (1998) 等发现,对于某些站点,最低气温与降水的关系仍然较为密切,不可忽视。我们研究发现对于中国一些地区来说,降水对最低气

温的影响也较大。因此,最低气温分干、湿状态分别进行模拟较为合适。

基于马尔可夫链的理查森类型中国天气发生器(BCC/RCG-WG)的降水模拟及其在中国广大地区的应用已经介绍过(Liao, et al, 2004; 廖要明等, 2004, 2006, 2009)。非降水变量的模拟及其在中国的应用虽然也有过一定的研究(陈明昌等, 1994; 林而达等, 1997; 吴金栋等, 2000; 马晓光等, 2002; 张东等, 2004; 张光辉等, 2004; 史婉丽等, 2006; 陈杰等, 2007; 何丙辉等, 2007)。但研究成果仅局限于部分地区或个别站点,且研究所用的资料较短,基本都是 20 世纪 90 年代以前的资料,难以准确反映当地气候的基本状态;研究内容主要限于对国外天气模型的参数化方案和模拟效果在中国部分地区的检验。而利用最新的尽可能长的逐日气候资料对中国各地的非降水变量的模拟进行全局性的研究,对模型的模拟能力在中国范围内进行检验,探讨模型在中国的应用等研究,建立起适用于中国广大地区的天气发生器,尚未见报道。针对这一问题,我们利用最新资料面向中国范围研究开发了中国天气发生器(BCC/RCG-WG),本文对其中非降水变量(最高气温、最低气温、日照时数、相对湿度和平均风速)的模拟模型进行介绍,并根据模拟结果和实测资料检验 BCC/RCG-WG 在中国广大地区的模拟能力。

## 2 非降水变量模拟模型

气候是一个随时间或其他变量演变的过程,其特点是变量在时间域上呈自相关,变量与变量呈互相关(陈明昌等, 1994)。例如,干日的最高气温与日照时数可能低于湿日的最高气温与日照时数;最高气温和最低气温具有时间后延效应等。所以,模拟气候要素的日变化和级别变化的关键是如何处理气候要素序列的相关性和季节性。在天气发生器中,首先将降水过程视为一个初级变量而独立于其他 5 个变量,干、湿日序列用两状态一阶马尔可夫链

进行拟合。最高气温( $T_{\max}$ )、最低气温( $T_{\min}$ )、日照时数( $H_S$ )、相对湿度( $f$ )和平均风速( $\bar{v}$ )等非降水变量与降水过程有关,但5个变量之间又存在互相关关系,可以用公式(1)进行模拟(Richardson, 1981)。

$$V_{p,i}(j) = M_i(j) + x_{p,i}(j) \times SD_i(j) \quad (1)$$

式中,  $i=1, 2, \dots, 365$ ;  $j=1, 2, 3, 4, 5$  分别代表最高气温、最低气温、日照时数、相对湿度和平均风速,  $V_{p,i}(j)$  表示第  $p$  年第  $i$  日变量  $j$  的模拟值,  $M_i(j)$ 、 $\sigma_i(j)$  分别表示第  $i$  日变量  $j$  的平均值和标准差, 它们可以用谐波分析的方法进行傅立叶级数展开求得;  $x_{p,i}(j)$  表示第  $p$  年第  $i$  日变量  $j$  的标准化残差, 可以用多变量的平稳过程来模拟。

## 2.1 谐波分析

最高气温、最低气温、日照时数、相对湿度和平均风速5个非降水变量在一年365 d中的平均值和标准差可以用谐波分析的方法, 分干、湿两种状态分别对其进行傅里叶级数展开求得(魏淑秋, 1985), 如干日和湿日各变量一年365 d的平均值可以分别展开如下:

$$M_i^0(j) = \bar{M}^0(j) + \sum_{k=1}^6 C_k^0(j) \times \cos\left[\frac{360}{365} \times (k \times i - T_k^0(j))\right] \quad (2)$$

$$M_i^1(j) = \bar{M}^1(j) + \sum_{k=1}^6 C_k^1(j) \times \cos\left[\frac{360}{365} \times (k \times i - T_k^1(j))\right] \quad (3)$$

式中,  $k$  为谐波的波数。我们利用方差比的方法(魏淑秋, 1985)对中国669个站点检验了各个谐波对上述5个非降水变量干、湿日平均值和标准差总过程的贡献率, 结果表明, 对于把一年分为13个时段的谐波计算来说, 中国大部分地区6个谐波的分量之和基本上可以完全收敛于原序列, 其中最高、最低气温干、湿日平均值用1—2个波展开就能达到99%的拟合精度, 日照时数、相对湿度和平均风速干、湿日的平均值用3—4个波展开能达到95%以上的拟合精度; 而对于标准差的展开来说较平均值要复杂些, 但基本上用6个波展开均能达到90%以上的拟合精度。所以BCC/RCG-WG中的参数计算  $k$  的最大值取6。  $M_i^0(j)$ 、 $M_i^1(j)$  分别表示第  $i$  日为干日或湿日时变量  $j$  的平均值,  $\bar{M}^0(j)$ 、 $C_k^0(j)$ 、 $T_k^0(j)$  和  $\bar{M}^1(j)$ 、 $C_k^1(j)$ 、 $T_k^1(j)$  分别为干日或湿日时变量  $j$  傅

立叶级数展开的傅立叶系数, 它们可以用矩形求和法将一年划分为13个时段分干、湿两种状态分别求得(林而达等, 1997)。

## 2.2 多变量生成模型

### 2.2.1 平稳过程转换

各非降水变量残差序列的模拟, 可以通过对多变量的平稳过程的模拟来实现。由于5个非降水变量各自的日均值和方差都具有周期性的季节变化, 因此在分析之前必须对每个变量的实际天气数据进行“标准化”处理, 使原来带有周期性的时间序列化为残差序列, 成为没有周期变化的平稳过程, 具体处理方法如下(Richardson, 1981)。

$$R_{p,i}(j) = \frac{X_{p,i}(j) - M_i^0(j)}{\sigma_i^0(j)} \quad (\text{当第 } i \text{ 日为干日时}) \quad (4)$$

$$R_{p,i}(j) = \frac{X_{p,i}(j) - M_i^1(j)}{\sigma_i^1(j)} \quad (\text{当第 } i \text{ 日为湿日时}) \quad (5)$$

式中,  $R_{p,i}(j)$  表示变量  $j$  在第  $p$  年第  $i$  日的实测残差,  $\sigma_i^0(j)$ 、 $\sigma_i^1(j)$  分别表示第  $i$  日为干日或湿日时变量  $j$  的标准差,  $X_{p,i}(j)$  表示变量  $j$  在第  $p$  年第  $i$  日的实测值。

### 2.2.2 构建相关矩阵

通过上述变换后得到的5个非降水变量的残差序列都是均值为0, 方差为1的平稳序列。这些序列不仅各自之间存在自相关, 5者之间还存在互相关。通过5个变量的残差序列, 计算他们之间的自相关系数和互相关系数, 构建后延零天的相关矩阵  $\mathbf{M}_0$  和后延一天的相关矩阵  $\mathbf{M}_1$  为

$$\mathbf{M}_0 = \begin{bmatrix} \rho_0(1,1) & \rho_0(1,2) & \rho_0(1,3) & \rho_0(1,4) & \rho_0(1,5) \\ \rho_0(2,1) & \rho_0(2,2) & \rho_0(2,3) & \rho_0(2,4) & \rho_0(2,5) \\ \rho_0(3,1) & \rho_0(3,2) & \rho_0(3,3) & \rho_0(3,4) & \rho_0(3,5) \\ \rho_0(4,1) & \rho_0(4,2) & \rho_0(4,3) & \rho_0(4,4) & \rho_0(4,5) \\ \rho_0(5,1) & \rho_0(5,2) & \rho_0(5,3) & \rho_0(5,4) & \rho_0(5,5) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} \rho_1(1,1) & \rho_1(1,2) & \rho_1(1,3) & \rho_1(1,4) & \rho_1(1,5) \\ \rho_1(2,1) & \rho_1(2,2) & \rho_1(2,3) & \rho_1(2,4) & \rho_1(2,5) \\ \rho_1(3,1) & \rho_1(3,2) & \rho_1(3,3) & \rho_1(3,4) & \rho_1(3,5) \\ \rho_1(4,1) & \rho_1(4,2) & \rho_1(4,3) & \rho_1(4,4) & \rho_1(4,5) \\ \rho_1(5,1) & \rho_1(5,2) & \rho_1(5,3) & \rho_1(5,4) & \rho_1(5,5) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中  $\rho_0(j, k)$  表示变量  $j$  与同一天变量  $k$  之间的互相关系数,  $\rho_1(j, k)$  表示变量  $j$  与前一天变量  $k$  之间的互相关系数。由于同一天两个不同变量之间的相

关系数  $\rho_0(j, k) = \rho_0(k, j)$ , 同一变量之间的相关系数  $\rho_0(j, j) = 1$ , 所以相关矩阵  $\mathbf{M}_0$  是一对称矩阵, 且可以简化为

$$\mathbf{M}_0 = \begin{bmatrix} 1 & \rho_0(1,2) & \rho_0(1,3) & \rho_0(1,4) & \rho_0(1,5) \\ & 1 & \rho_0(2,3) & \rho_0(2,4) & \rho_0(2,5) \\ & & 1 & \rho_0(3,4) & \rho_0(3,5) \\ & & & 1 & \rho_0(4,5) \\ & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

### 2.2.3 残差模拟模型

5 个变量的逐日残差可以用 Matalas(1967) 给出的一个多变量平稳过程的产生公式来模拟。

$$\begin{bmatrix} \chi_{p,i}(1) \\ \chi_{p,i}(2) \\ \chi_{p,i}(3) \\ \chi_{p,i}(4) \\ \chi_{p,i}(5) \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \chi_{p,i-1}(1) \\ \chi_{p,i-1}(2) \\ \chi_{p,i-1}(3) \\ \chi_{p,i-1}(4) \\ \chi_{p,i-1}(5) \end{bmatrix} + \mathbf{B} \begin{bmatrix} \epsilon_{p,i}(1) \\ \epsilon_{p,i}(2) \\ \epsilon_{p,i}(3) \\ \epsilon_{p,i}(4) \\ \epsilon_{p,i}(5) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中,  $\chi_{p,i}(j)$  与  $\chi_{p,i-1}(j)$  分别是变量  $j$  在第  $p$  年第  $i$  日与第  $i-1$  日的残差模拟值;  $\epsilon_{p,i}(j)$  是服从标准正态分布的随机数,  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$  是利用前面求得的相关系数矩阵  $\mathbf{M}_0$ 、 $\mathbf{M}_1$  定义的两个  $5 \times 5$  矩阵, 它们的计算公式(Brockwell, et al, 1991)

$$\mathbf{A} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_0^{-1} \quad (10)$$

$$\mathbf{B} \mathbf{B}^T = \mathbf{M}_0 - \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_0^{-1} \mathbf{M}_1^T \quad (11)$$

式中, 上标  $-1$  和  $T$  分别代表逆矩阵和转置矩阵。

## 3 资料及方法

为了使得到的各变量的模拟参数能较好地代表各地区的实际气候状况, 计算最高气温、最低气温和日照时数等的模拟参数至少需要 15 年以上的逐日资料(Soltani, et al, 2003), 资料年代越长越能准确反映当地气候的基本态。通过对中国各主要气象站点逐日最高气温、最低气温、日照时数、相对湿度、平均风速和降水实测资料的统计分析, 选择资料比较齐全, 历史年代较长(1971—2000 年)的 669 个站点作为研究的地区(图 1), 根据这些地区 1971—2000 年共 30 年的逐日观测资料, 分别计算求取各地干、湿日的傅立叶系数和相关系数矩阵。利用计算的模拟参数, 结合降水模拟即可实现对该地区逐日最高气温、最低气温和日照时数、相对湿度和平均风速等非降水变量的模拟。

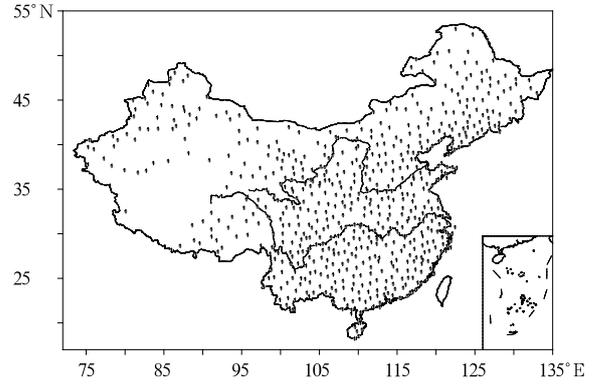


图 1 BCC/RCG 天气发生器非降水变量模拟站点分布

Fig. 1 Stations distribution for the non-precipitation simulation by the BCC/RCG-WG

## 4 模拟效果评估

为了评估天气发生器(BCC/RCG-WG)对中国各地非降水变量的模拟效果, 本文根据中国 669 个站点(图 1)1971—2000 年的逐日最高气温、最低气温、日照时数、相对湿度和平均风速实测资料及这 669 个站点上述 5 个非降水变量 100 年的逐日模拟结果, 以下面 10 个指标来比较模拟值和实测值以月和年为统计特征的多年平均值。(1)月(年)平均最高气温, (2)月(年)平均最低气温, (3)月(年)平均日照时数, (4)月(年)平均相对湿度, (5)月(年)平均风速, (6)月(年)平均气温日较差(TR)(即日最高气温 - 日最低气温), (7)年高温(日最高气温  $\geq 35^\circ\text{C}$ ) 日数, (8)年危害性高温(日最高气温  $\geq 38^\circ\text{C}$ ) 日数, (9)年低温(日最低气温  $< 0^\circ\text{C}$ ) 日数, (10)年(月)极端最高(低)气温。并采用均方根误差( $E_{\text{RMS}}$ )来比较模拟值与实测值的偏差,  $E_{\text{RMS}}$  越小, 表明模拟值偏离实际值越小, 模拟效果越好。均方根误差为

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (12)$$

式中  $y_i$  和  $\hat{y}_i$  分别为实测值和模拟值。

比较中国 669 个站点模拟和实测的多年平均最高气温、最低气温、日照时数、相对湿度、平均风速和气温日较差(图 2)可以看出, 由天气发生器(BCC/RCG-WG)模拟的中国各地上述 5 个非降水变量及其气温日较差的年平均值与实测的年平均值非常接近, 相关系数基本都在 0.99 以上, 相关性很好。由

表 1 可以看出,年平均最高气温和最低气温的均方根误差只有 0.2℃,年平均气温日较差的均方根误差为 0.3℃,年日照时数的均方根误差也只有

70.9 h,年平均相对湿度的均方根差只有0.6%,年平均风速的均方根差只有 0.2 m/s。

比较中国669个站点模拟和实测的最高气

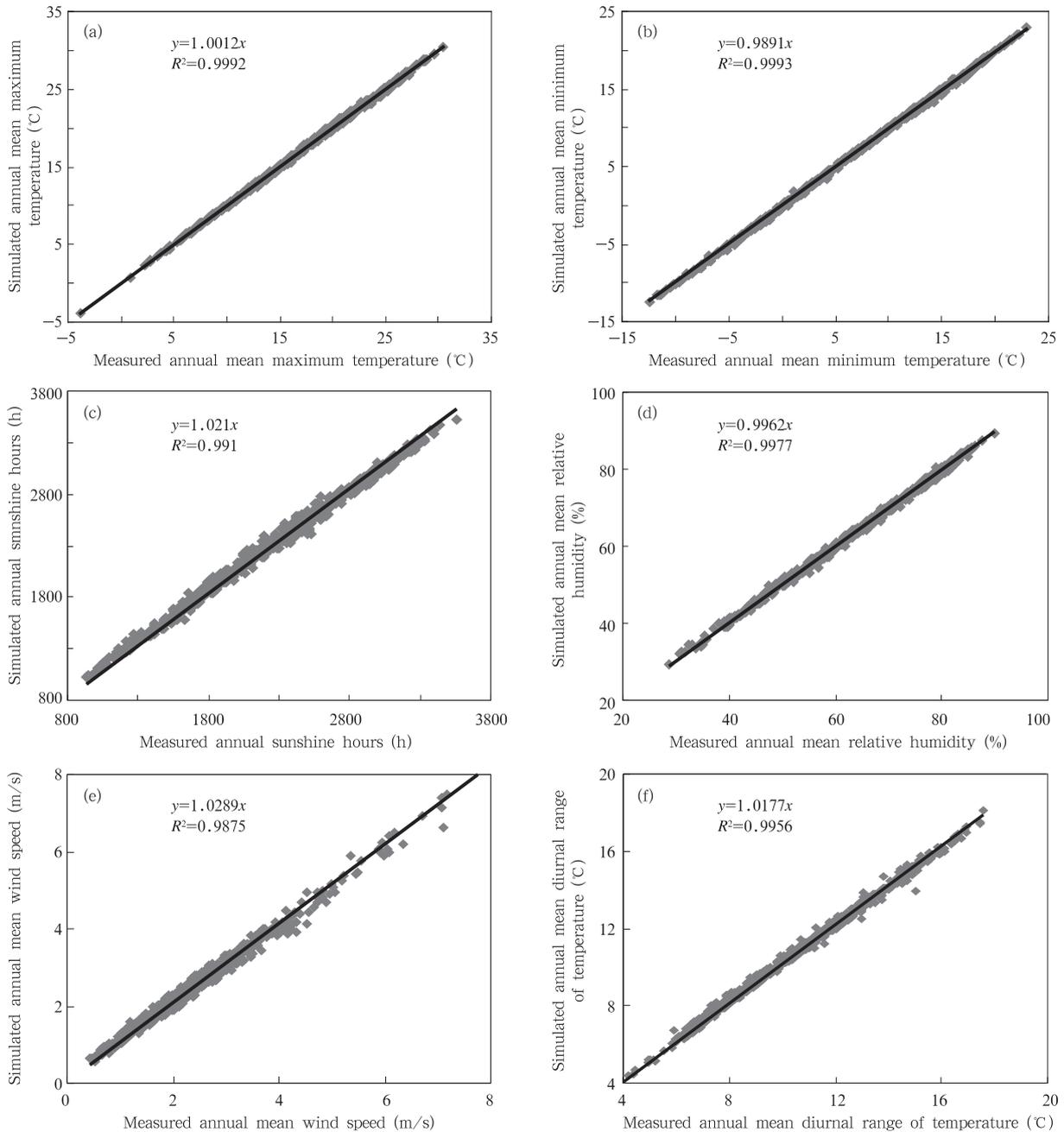


图 2 中国 669 个站点非降水变量模拟与实测结果年平均分布及拟合线

(a. 最高气温, b. 最低气温, c. 日照时数, d. 相对湿度, e. 风速, f. 气温日较差)

Fig. 2 The 100 year daily simulation and the observation during 1971 to 2000 for the non-precipitation variables in terms of annual mean

(a. Maximum temperature, b. Minimum temperature, c. Sunshine hours, d. Relative humidity, e. Wind speed and f. diurnal range of temperature)

表 1 5 个非降水变量及其气温日较差模拟和实测月平均值及年平均值的均方根误差

Table 1 Monthly and yearly RMSEs between the 100 year daily simulation and the observation during 1971 to 2000 for the non-precipitation variables

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
$T_{\max}(\text{C})$	0.4	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.4	0.5	0.6	0.6	0.4	0.4	0.2
$T_{\min}(\text{C})$	0.5	0.6	0.4	0.7	0.6	0.5	0.4	0.5	0.4	0.6	0.5	0.6	0.2
$H_s(\text{h})$	14.9	10.2	19.7	17.3	14.0	17.8	20.6	16.5	20.9	16.9	17.0	14.6	70.9
$f(\%)$	13.3	7.3	6.0	11.2	11.3	8.2	7.9	7.4	4.4	6.3	8.1	12.1	0.6
$\bar{v}(\text{m/s})$	0.8	0.7	0.7	0.6	0.6	0.7	0.7	0.9	0.8	0.7	0.6	0.6	0.2
TR(C)	0.6	0.7	0.7	0.6	0.5	0.6	0.5	0.6	0.6	0.5	0.5	0.6	0.3

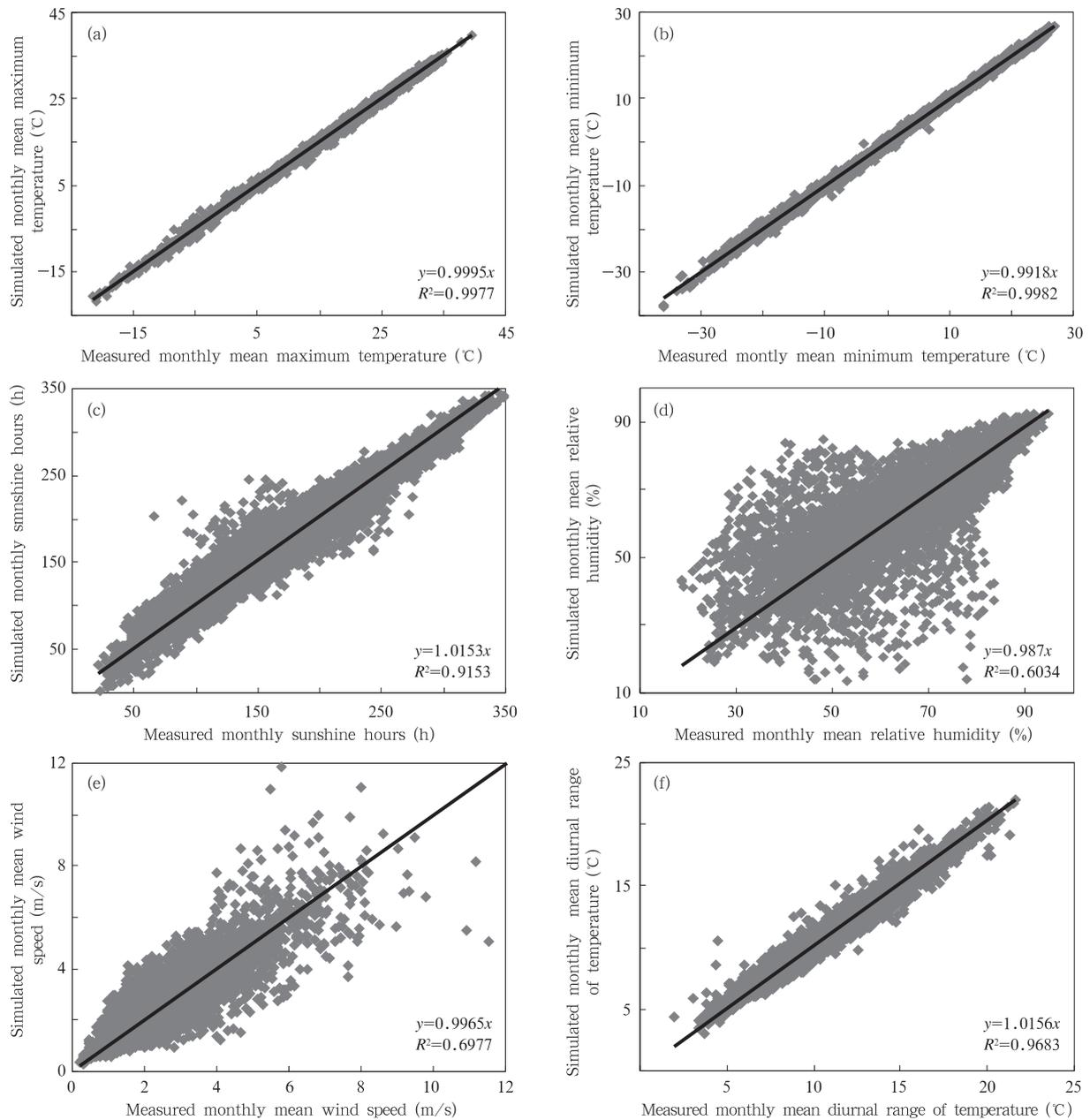


图 3 中国 669 个站点非降水变量模拟与实测结果月平均值分布及拟合线(说明同图 2)

Fig. 3 As in Fig. 2 but for scatter plot in terms of monthly mean

温、最低气温、日照时数、相对湿度和平均风速各月平均值(图3)可以看出,由天气发生器(BCC/RCG-WG)模拟的中国各地最高气温、最低气温以及气温日较差的各月平均值与实测的月平均值非常接近,月平均最高气温和最低气温的相关系数均在0.99以上,月平均日较差的相关系数接近0.97,相关性很好,各月平均最高气温、最低气温以及气温日较差模拟值和实测值的均方根误差基本在0.4—0.7℃(表1);模拟的日照时数月平均值和实测的月平均值也

较为接近,相关系数将近0.92,各月平均日照时数模拟值和实测值的均方根误差基本在10—20h(表1);但是相对湿度和平均风速在月统计特征上相关性相对较小,分别只有0.6和0.7左右,各月平均相对湿度模拟值和实测值的均方根误差在4%—14%,各月平均风速模拟和实测值的均方根误差在0.6—0.9m/s(表1)。

分析中国669个站点模拟和实测的年高温日数、危害性高温日数、年低温日数以及年极端最高、

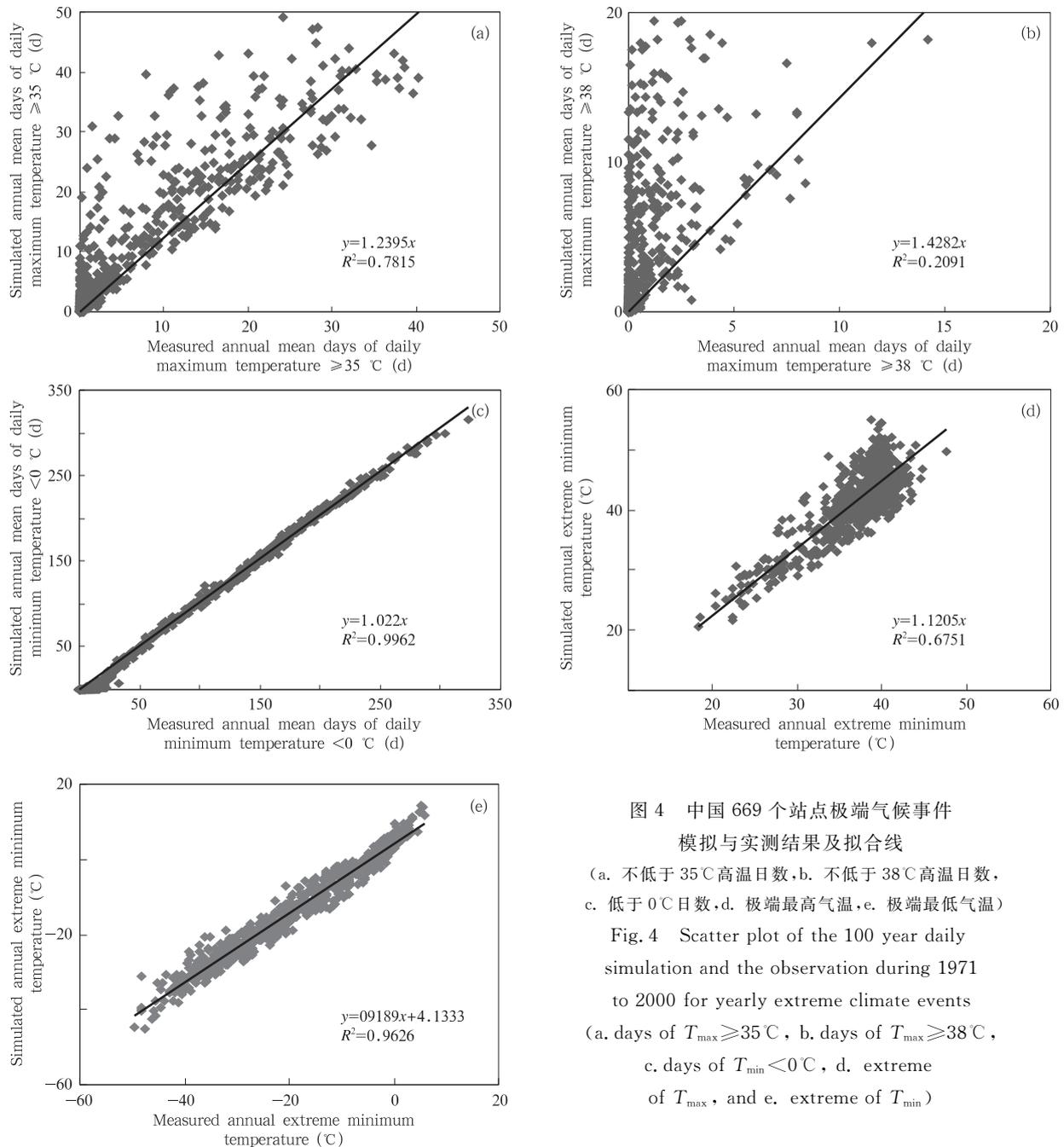


图4 中国669个站点极端气候事件模拟与实测结果及拟合线

(a. 不低于35℃高温日数, b. 不低于38℃高温日数, c. 低于0℃日数, d. 极端最高气温, e. 极端最低气温)  
 Fig. 4 Scatter plot of the 100 year daily simulation and the observation during 1971 to 2000 for yearly extreme climate events (a. days of  $T_{max} \geq 35^{\circ}C$ , b. days of  $T_{max} \geq 38^{\circ}C$ , c. days of  $T_{min} < 0^{\circ}C$ , d. extreme of  $T_{max}$ , and e. extreme of  $T_{min}$ )

最低气温(图 4)可以看出,天气发生器(BCC/RCG-WG)可以很好地模拟中国各地的年低温日数,模拟值和实测值非常接近,相关系数在 0.99 以上。但对于高温日数、危害性高温日数以及极端最高、最低气温的模拟不是很理想,它们的模拟值较实测值普遍偏大。从模拟和实测的年高温( $\geq 35^{\circ}\text{C}$ )日数及其差值的分布(图 5)来看,中国两个主要的高温中心——江南和新疆,模拟值与实测值相差不是很大,特别是新疆地区,不管是年高温日数还是高温日数

的空间分布,模拟与实测资料均非常接近。模拟值与实测值相差较大的区域主要出现在华南地区,模拟的年高温日数较实测的年高温日数普遍偏多 15 d 以上。年极端最高气温除江南和华南以及湖北、安徽等地模拟值较实测值普遍偏高  $5^{\circ}\text{C}$  以上外,中国其余大部分地区偏高  $5^{\circ}\text{C}$  以下。其中,北方大部分地区偏高  $3^{\circ}\text{C}$  以下(图 6a);年内各月极端最高气温主要在 5—10 月模拟值较实测值偏高,而在 11—4 月中国大部分地区模拟值较实测值偏低(图 7a)。

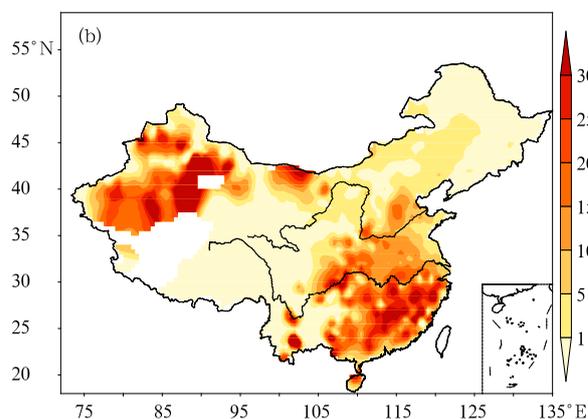
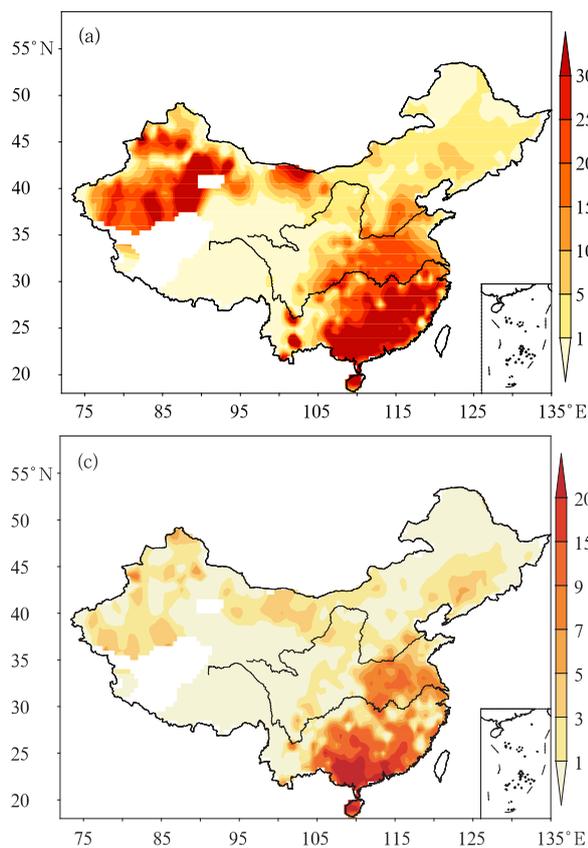


图 5 中国多年平均高温( $\geq 35^{\circ}\text{C}$ )日数模拟和实测分布(单位:d)

(a. 模拟, b. 实况, c. 模拟与实况的差)

Fig. 5 Comparison of the simulated and observed numbers of days with  $T_{\max}$  at or above  $35^{\circ}\text{C}$  in China (days): (a) the simulated, (b), the observed and (c) the differences between the simulated and the observed

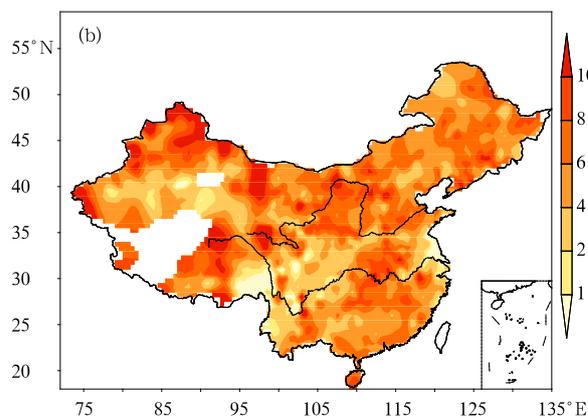
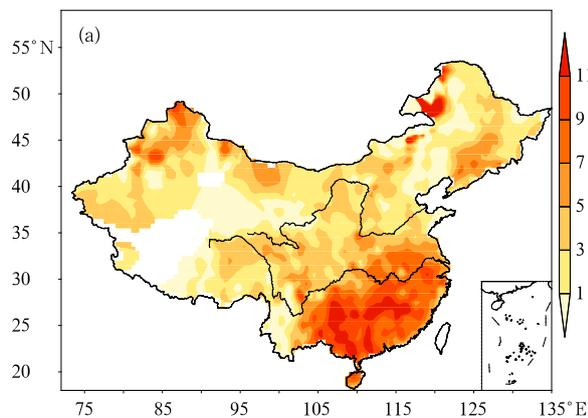


图 6 中国极端最高气温(a)、极端最低气温(b)模拟和实测差值分布(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 6 Comparison of the difference between the simulated and observed extreme  $T_{\max}$  (a) and extreme  $T_{\min}$  (b) in China

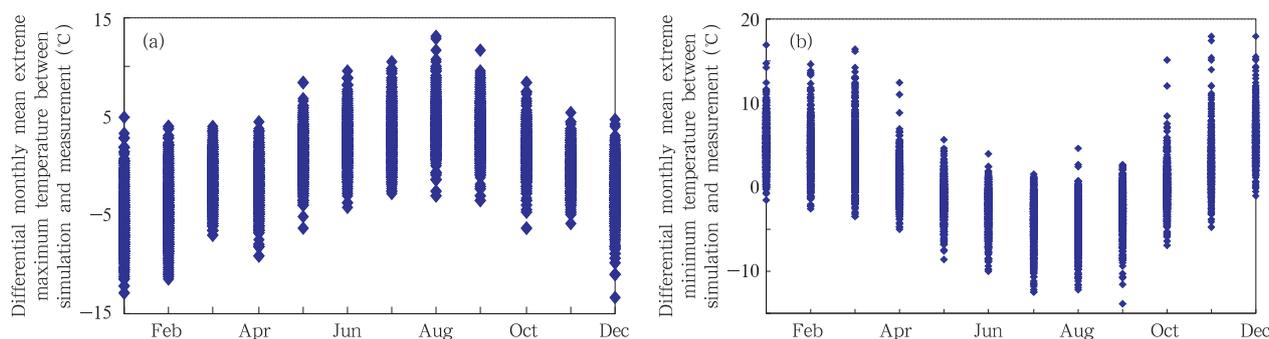


图7 中国极端最高气温(a)、极端最低气温(b)模拟和实测差值各月变化

Fig. 7 Monthly changes in the difference between the simulated and observed extreme  $T_{\max}$  (a) and extreme  $T_{\min}$  (b) in China

年极端最低气温中国大部分地区模拟值较实测值偏高  $4^{\circ}\text{C}$  以上,其中北方大部分地区偏高  $6^{\circ}\text{C}$  以上(图 6b);各月极端最低气温主要在 11—4 月模拟值较实测值偏高,而在 5—10 月中国大部分地区模拟值较实测值偏低(图 7b),年内变化趋势正好与极端最高气温相反。

## 5 结论与讨论

(1) 天气发生器(BCC/RCG-WG)利用谐波分析和多变量生成模型,可以较好地模拟中国各地的逐日最高气温、最低气温、日照时数、相对湿度和平均风速等 5 个非降水变量。

(2) 天气发生器(BCC/RCG-WG)模拟的中国各地年平均最高气温、最低气温、日照时数、相对湿度和平均风速以及气温日较差与实测值非常接近。其中年平均最高气温和最低气温的均方根误差只有  $0.2^{\circ}\text{C}$ ,年平均气温日较差的均方根误差为  $0.3^{\circ}\text{C}$ ,年日照时数的均方根误差为  $70.9\text{ h}$ ,年平均相对湿度的均方根误差为  $0.6\%$ ,年平均风速的均方根误差为  $0.2\text{ m/s}$ 。

(3) 天气发生器(BCC/RCG-WG)模拟的中国各地月平均最高气温、最低气温和气温日较差与实测值非常接近,各月平均最高气温、最低气温以及气温日较差模拟值和实测值的均方根误差基本在  $0.4\text{—}0.7^{\circ}\text{C}$ ,这可能与最高气温、最低气温具有明显的年变化周期有关,可以利用谐波分析的方法较好地模拟出它们一年中各月的变化规律。模拟的月平均日照时数和实测值也较为接近,各月平均日照时数模拟值和实测值的均方根误差基本在  $10\text{—}20\text{ h}$ ,日照时数虽然也具有明显的年变化周期,但受天气

条件如天空云量等的影响较大(左大康等,1963),模拟的效果较最高气温和最低气温要差;月平均相对湿度和平均风速的模拟效果不是很理想,各月平均相对湿度模拟值和实测值的均方根误差在  $4\%\text{—}14\%$ ,各月平均风速模拟值和实测值的均方根误差在  $0.6\text{—}0.9\text{ m/s}$ ,这可能与相对湿度、平均风速的年变化周期没有前 3 个变量明显,通过平稳过程转化后得到的残差序列不完全服从正态分布,所以虽然年平均模拟较好,但各月中的变化规律难以较好地模拟出来。

(4) 由于极端气候事件属于小概率事件,在有限长度(30 年)的实测气候资料中极端气候事件资料更少,所以 BCC/RCG-WG 对平均状态的模拟能力远好于极端气候事件的模拟能力。改进天气发生器模拟模型对极端气候事件的模拟能力,是天气发生器未来研究工作的一个难点也是重要方向之一。BCC/RCG-WG 对于中国各地高温日数、危害性高温日数、极端最高气温和极端最低气温的模拟值较实测值普遍偏大。其中高温日数、年极端最高气温偏大的区域主要出现在中国的南方地区,且极端最高气温偏大明显地出现在夏半年,这可能与中国这些地区夏季受海洋性季风气候的影响比较明显,实际气温的变化比较温和有关;而冬季中国气温的海洋性特征不明显,极端低温由北向南递增,主要受亚洲高压的影响,北方地区变化更加剧烈,所以极端最低气温的模拟值偏高更为明显(丁裕国等,2004;封国林等,2009)。但对于中国两个主要的高温中心(江南和新疆)模拟值与实测值相差较小。此外, BCC/RCG-WG 能够较好地模拟中国各地的年低温日数,模拟值和实测值非常接近。

(5) 天气发生器 BCC/RCG-WG 作为一个统计模型,可以根据中国 669 站的逐日历史气候资料,生成与实测资料在统计意义上较为一致的无限长的资料序列,为气候影响评价和极端气候事件分析提供了资料基础(廖要明等,2006)。同时,进一步研究天气发生器模拟参数的气候变化规律(廖要明等,2009),以及天气发生器对气候预测(陈德亮,2004)和气候变化情景的模拟(陈喜等,2001;Chen, et al, 2008),开发更高级的 BCC/RCG-WG 软件版本,是我们目前正在研究的内容之一,部分研究成果已经在中国国家气候中心和省级气候业务部门得到应用(刘绿柳等,2008)。

## 参考文献

- 陈杰, 张勋昌, 刘文兆等. 2007. CLIGEN 非降水参数在黄土高原的适应性评估. 中国水土保持科学, 5(5):21-31
- 陈明昌, 张强, 杨晋玲等. 1994. 降水、温度和日照时数的随机生成模型和验证. 干旱地区农业研究, 12(2):17-26
- 陈德亮. 2004. 天气发生器(Weather Generator)在气候预测中的应用. 气候预测评论, 10(10):21-26
- 陈喜, 陈永勤. 2001. 日雨量随机解集模式研究. 水利学报, 4(4):47-52
- 丁裕国, 刘吉峰, 张耀存. 2004. 基于概率加权估计的中国极端气温时空分布模拟试验. 大气科学, 28(5):771-782
- 范丽军, 符淙斌, 陈德亮. 2005. 统计降尺度法对未来区域气候变化情景预估的研究进展. 地球科学进展, 20(3):320-329
- 封国林, 杨杰, 万仕全等. 2009. 温度破纪录事件预测理论研究. 气象学报, 67(1):61-74
- 何丙辉, 缪弛远, 陈晓燕等. 2007. CLIGEN 气候生成器模型在紫色土地区的适应性研究. 水土保持学报, 21(3):183-187
- 廖要明, 张强, 陈德亮. 2004. 中国天气发生器的降水模拟. 地理学报, 59(5):689-698
- 廖要明, 潘学标, 张强等. 2006. 逐日降水量的模拟及其在作物气候风险分析中的应用. 华北农学报, 21(增刊):206-212
- 廖要明, 陈德亮, 高歌等. 2009. 中国天气发生器降水模拟参数的气候变化特征. 地理学报, 64(7):871-878
- 林而达, 张厚瑄, 王京华等. 1997. 全球气候变化对中国农业影响的模拟. 北京:中国农业科技出版社, 142pp
- 刘绿柳, 孙林海, 廖要明等. 2008. 国家级极端高温短期气候预测系统的研制及应用. 气象, 34(10):102-107
- 马晓光, 沈佐锐. 2002. 随机天气发生器的可视化编程及其将来在农业生态学上的应用. 中国农业科学, 35(12):1473-1478
- 史婉丽, 杨勤科, 穆婉红. 2006. 随机气候生成器在黄土高原的适用性检验. 中国水土保持科学, 4(2):18-23
- 魏淑秋. 1985. 农业气象统计. 福州:福建科学技术出版社, 377pp
- 吴金栋, 王馥棠. 2000. 随机天气模型参数化方案的研究及其模拟能力评估. 气象学报, 58(1):49-59
- 张东, 张万昌. 2004. SWAT 2000 气象模拟器的随机模拟原理、验证及改进. 资源科学, 26(4):28-36
- 张光辉. 2004. CLIGEN 天气发生器在黄河流域的适应性研究. 水土保持学报, 18(1):175-178
- 张岩, 朱清科. 2006. 土壤侵蚀过程模型中的天气发生器研究述评. 中国水土保持科学, 4(3):103-108
- 左大康, 王懿贤, 陈建绥. 1963. 中国地区太阳总辐射的空间分布特征. 气象学报, 33(1):78-96
- Benestad R E, Hanssen-Bauer I, Chen D. 2008. Empirical-Statistical Downscaling. Singapore: World Scientific. Publishing Co. Pte. Ltd., 300 pp
- Bannayan M, Crout N M J. 1999. A stochastic modelling approach for real-time forecasting of winter wheat yield. Field Crops Res, 62:85-95
- Brockwell P J, Davis R A. 1991. Time Series: Theory and Methods (2nd ed). Springer-Verlag, 577pp
- Chen D, Achberger C, Postgård U, et al. 2008. Using a weather generator to create future daily precipitation scenarios for Sweden//Research Report C76. Earth Sciences Centre, University of Gothenburg, Gothenburg, Sweden, 82pp
- Hayhoe H N. 1998. Relationship between weather variables in observed and WXGEN generated data series. Agri Forest Meteor, 90:203-214
- Lennartsson J, Baxevani A, Chen D. 2008. Modelling precipitation in Sweden using multiple step Markov chains and a composite model. J Hydrology, 363: 42-59, Doi: 10. 1016/j. jhydrol. 2008. 10. 003
- Liao Yaoming, Zhang Qiang, Chen Deliang. 2004. Stochastic modeling of daily precipitation in China. J Geogr Sci, 14(4):417-426
- Matalas N C. 1967. Mathematical assessment of synthetic hydrology. Water Resource Res, 3:937-945
- Richardson C. 1981. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. Water Resources Res, 17: 182-190
- Semenov M A, Brooks R J, Barrow E M, et al. 1998. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. Climate Res, 10:95-107
- Semenov M A. 2008. Simulation of extreme weather events by a stochastic weather generator. Climate Res, 35:203-212
- Soltani A, Hoogenboom G. 2003. Minimum data requirements for parameter estimation of stochastic weather generators. Climate Res, 25:109-119
- Wetterhall F, Bárdossy A, Chen D, et al. 2006. Daily precipitation downscaling techniques in different climate regions in China. Water Resources Res, 42, W11423, Doi: 10. 1029/2005WR004573
- Wilks D S. 1999. Interannual variability and extreme-value characteristics of several stochastic daily precipitation models. Agri Forest Meteor, 93: 153-169
- Wilks D S, Wilby R L. 1999. The weather generation game: a review of stochastic weather models. Progr Phys Geogr, 23:329-357