

CLIGEN 非降水参数在黄土高原的适应性评估

陈杰^{1,2}, 张勋昌³, 刘文兆^{1,2†}, 李志^{1,2}

(1. 西北农林科技大学资源与环境学院; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所:712100, 陕西杨凌;
3. USDA-ARS Grazinglands Research Laboratory, 73036, El Reno, Oklahoma, USA)

摘要 天气生成器(CLIGEN)可以产生以日为时间单元的天气数据,从而广泛应用于土壤侵蚀和作物生长模拟模型,其模拟结果的优劣直接影响这些模型的输出结果。利用散布黄土高原的12个标准气象站点长时间序列的气候数据评估 CLIGEN 模拟非降水参数(温度、太阳辐射、风速)的能力。结果表明:CLIGEN 能较好的模拟日最高温度;对日最低温度与露点温度的模拟次之;模型对太阳辐射和风速的模拟较差,特别是对风速的模拟,模拟值要显著的高于实测值。CLIGEN 模拟的温度日较差、第1天最高温度与第2天最低温度之差、第2天最高温度与第1天最低温度之差的均值和标准差普遍偏高,但均值的误差较小,而标准差被过高模拟;模型在产生气候数据时,没有保持逐日渐变性和连续性。CLIGEN 能够较好的模拟最高温度与最低温度的季节连续性与相关性;而过高的模拟了太阳辐射的季节相关性以及温度与太阳辐射的季节互相关性;同时,模型没有模拟出各气象要素自身及其之间的逐日相关性。

关键词 天气生成器;非降水参数;适应性评估;黄土高原

Assessment of CLIGEN non-precipitation parameters on the Loess Plateau

Chen Jie^{1,2}, Zhang Xunchang³, Liu Wenzhao^{1,2}, Li Zhi^{1,2}

(1. College of Nature Resource and Environment, Northwest A & F University; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources:712100, Yangling, Shaanxi, China;
3. USDA-ARS Grazinglands Research Laboratory, 73036, El Reno, Oklahoma, USA)

Abstract Soil erosion models and crop growth simulation models are often used to assess the potential impact of climate variations. Most simulation models require daily weather data, which are frequently synthesized using stochastic daily weather generators. The objective of this study was to evaluate the ability of the CLIGEN Generator (CLIGEN) to generate non-precipitation parameters, including daily temperatures, solar radiation, and wind velocity at twelve standard meteorological stations on the Loess Plateau. The results demonstrated that the CLIGEN model reproduced daily maximum temperature reasonably well. In comparison, daily minimum and dew point temperature were less well reproduced, probably because of the range check imposed in the model and used the standard deviation of minimum temperature to compute dew point. Daily solar radiation and wind velocity were less well generated than temperature; especially for wind velocity the generated data were significantly greater than the measured data. Both means and standard deviations of the same day temperature range and one day lag temperature ranges of the CLIGEN-generated data were consistently greater than those of the measured data on all sites. But the means were better reproduced than the standard deviations. Tempera-

收稿日期:2007-06-13 修回日期:2007-08-06

项目名称:国家自然科学基金国际合作与交流项目“黄土高原水资源、土壤侵蚀和作物生产对未来全球气候变化的潜在响应”(40640420061);中国科学院海外杰出学者基金项目“黄土高原水资源、土壤侵蚀和作物生产对未来全球气候变化的潜在响应”(2005-2-3)

第一作者简介:陈杰(1981—),男,硕士研究生。主要研究方向:流域水文生态。E-mail:chj092413@yahoo.com.cn

† 责任作者简介:刘文兆(1960—),男,博士,研究员,博士生导师。主要研究方向:流域水文生态、作物-水分关系与节水型生态农业。E-mail:wzliu@ms.iswc.ac.cn

ture tends to change in a gradual and continuous manner, but CLIGEN generated data did not reproduced this trend. Seasonal serial correlations of maximum and minimum temperatures were well reproduced, but those of solar radiation and cross correlation between temperature and solar radiation were poorly reproduced by the CLIGEN model. There were no day to day correlations for the CLIGEN-generated data, including solar radiation, maximum and minimum temperature.

Key words CLIGEN; non-precipitation parameter; assessment; Loess Plateau

包括土壤侵蚀模型、作物生长模型在内的许多生态类模型的运行都需要以日为时间单元的天气数据来驱动。但不少观测站点的气候资料由于数据时段较短或缺测,常常不能满足这方面研究的需要。国外迄今已经开发出用于模拟当前气候的多个有影响的随机天气模型^[1-3](如 WGEN、USCLIMATE、CLIGEN 等),也被称为天气生成器。CLIGEN 是美国农业部为开发水蚀预报模型 WEPP (water erosion prediction project) 而建立的一种随机天气生成器,它可以用于产生与现有气候资料具有相同统计特征的每日天气状况(包括降水量,最高、最低、露点温度,风速,风向及太阳辐射等)。同时,使用有实测数据资料的站点,通过模型参数的空间内插,模型还可以产生相邻无实测数据站点的日天气数据^[4]。更重要的是该模型适应于产生季节性预测的多种气候情景,可以应用于对 GCMs (global climate models) 模拟的月值数据进行时间尺度的解集,产生日值数据,从而应用于全球气候变化对土壤侵蚀、作物产量的影响等方面的研究^[5-6]。

迄今,国外已有一些科研人员对天气生成器 CLIGEN 非降水参数进行了评估^[7-8],然而,CLIGEN 是建立在美国的气候特征之上的,由于区域气候的差异性,要想在黄土高原应用 CLIGEN,就应该利用该地区的实测数据对其进行详尽的评估。国内也有研究人员对 CLIGEN 进行了评估^[9-11],但是,这些评估均只使用了 1 个或少数几个站点对个别参数进行评估,目前尚没有人通过选取多站点对 CLIGEN 在黄土高原适应性进行详细系统的评估。由于黄土高原气候的独特性及复杂性,选取多站点进行系统的评估是很有必要的。本研究拟通过利用遍布黄土高原的 12 个标准气象站点长时间序列日气象数据对 CLIGEN (v5.111) 模拟非降水参数(包括最高、最低、露点温度,太阳辐射,风速)的能力进行详尽的评估,这将对改进 CLIGEN 模型结构,提高模拟精度具有一定的参考价值,为建立适合黄土高原独特气候环境条件的天气生成器提供理论依据,同时为水文、生态、作物生长和土壤侵蚀等模型的发展起到积极的

推动作用。

1 模型非降水参数生成简介

日太阳辐射,最高、最低和露点温度利用正态分布产生。日最高、最低温度的均值和标准差直接由站点的实测记录产生,日露点温度的均值由站点的实测记录产生,而标准差由最低温度标准差产生。用基于月值的站点参数文件运行 CLIGEN 产生每日的天气序列。模型中每日温度通过以下公式^[3]计算:

$$t_{\max} = \mu_{\max} + \sigma_{\max} \chi \quad (1)$$

$$t_{\min} = \mu_{\min} + \sigma_{\min} \chi \quad (2)$$

$$t_{\text{dew}} = \mu_{\text{dew}} + \sigma_{\min} \chi \quad (3)$$

式中: t_{\max} 为产生的日最高温度,℃; t_{\min} 为产生的日最低温度,℃; t_{dew} 为产生的日露点温度,℃; μ_{\max} 为特定月份的日均最高温度,℃; μ_{\min} 为特定月份的日均最低温度,℃; μ_{dew} 为特定月份的日均露点温度,℃; σ_{\max} 为该月日最高温度标准差,℃; σ_{\min} 为该月日最低温度标准差,℃; χ 为产生的标准正态偏差。每日的标准正态偏差是根据 2 个随机数得到的,前 1 天的第 2 个数用来生成当天的第 1 个数。同时,每个变量是独立产生的,对最低温度实行范围控制使一天中最低温度小于最高温度。

太阳辐射(R)是根据以下公式产生的:

$$R = \mu_r + \sigma_r \chi \quad (4)$$

式中 μ_r 和 σ_r 分别为特定月份的日均太阳辐射和标准差。 σ_r 根据下式确定:

$$\sigma_r = (R_{\max} - \mu_r) / 4 \quad (5)$$

式中 R_{\max} 为一年中可能的日最大太阳辐射值,它是根据站点的纬度和该年的天数计算出来的,如果产生的 R 大于 R_{\max} ,则 R 取 R_{\max} 的 90%,如果产生的 R 小于 0,则 R 取 R_{\max} 的 5%。

每日风速利用偏正态分布产生,风向数据来源于实测数据中划分的 16 个风向中各个风向的百分比。每日风速(v)通过下式^[3]产生:

$$v = \mu_v + \frac{2\sigma_v}{\xi} \left\{ \left[\frac{\xi}{6} \left(x - \frac{\xi}{6} \right) + 1 \right]^3 - 1 \right\} \quad (6)$$

式中 μ_v 、 σ_v 和 ξ 分别为特定月份各风向日平均风速、标准差和偏度系数。

采用以上方法,可根据 CLIGEN 的默认模式,即在不内插的情况下根据月统计量来产生日天气序列。为了产生更具有时间连续性的每日天气数据多种插值方法(如线形插值、傅里叶插值、修正线形插值)被集成到模型中,用来把每月的统计量缩降成日参数,这些经过缩降的日参数再通过以上的公式来

生成每日天气数据。

2 材料与方法

选取黄土高原 12 个标准气象站点的数据评估 CLIGEN 模型,所选站点年降水量具有明显的梯度,从银川的 193.4 mm 到长武的 576.4 mm;同时,站点散布整个黄土高原,具有良好的代表性。站点基本情况见表 1。

表 1 研究站点的基本情况

Tab.1 General information of research sites

站点	经度/(°)	纬度/(°)	海拔/m	辐射数据年份	其他资料数据年份	年均降水量/mm
银川	106.22	38.48	1 111	1973—2003	1951—2001	193.4
兰州	103.88	36.05	1 517	1960—2003	1951—2001	318.8
西宁	101.77	36.62	2 261	1959—2003	1954—2001	373.4
大同	113.33	40.10	1 067	1961—2000	1955—2001	378.1
东胜	109.98	39.83	1 460	1992—2003	1957—2001	386.3
呼和浩特	111.68	40.82	1 063	1960—1965	1952—2004	414.6
太原	112.55	37.78	778	1961—2000	1951—2001	442.5
固原	106.27	36.00	1 753	1985—2003	1957—2001	455.9
天水	105.75	34.58	1 142	1961—1966	1951—2001	516.1
延安	109.50	36.60	958	1990—2003	1951—2001	533.4
西安	108.93	34.30	398	1961—2003	1951—2001	570.4
长武	107.80	35.20	1 207	—	1957—2001	576.4

CLIGEN 产生的数据是基于实测数据的统计特征而生成的,用实测的逐日天气数据计算各气象要素的统计参数建立 CLIGEN 的输入文件“*.par”。该文件中包含如下非降水参数(每个参数均包含 12 个月的数据,是按月计算的均值):日均最高、最低温度及其标准差,日均露点温度,日均太阳辐射及其标准差,16 个方向上的风速均值、标准差、偏度系数、出现该风向的风所占的比率。各站点露点温度根据平均温度和相对湿度采用马格努斯公式的变形公式计算求得。计算方法如下:

湿球未结冰时

$$\theta_{\text{dew}} = \frac{235 \left(\lg f + \frac{7.45t}{235+t} \right)}{7.45 - \left(\lg f + \frac{7.45t}{235+t} \right)} \quad (7)$$

湿球结冰时

$$\theta_{\text{dew}} = \frac{265 \left(\lg f + \frac{9.5t}{265+t} \right)}{9.5 - \left(\lg f + \frac{9.5t}{265+t} \right)} \quad (8)$$

式中: θ_{dew} 为日均露点温度, °C; t 为日均温度, °C; f 为日均相对湿度, %。

使用实测逐日天气数据建立“*.par”文件后,就可以将其作为 CLIGEN 的输入文件,使用 CLIGEN (v5.111) 默认的随机种子并且不使用内插产生 100 年的日天气数据“*.cli”。“*.cli”文件包括 6 个逐日非降水天气数据:最高温度、最低温度、太阳辐射、风向、风速和露点温度。

对实测和模型产生的温度的均值、标准差、偏度系数、峰度系数和极端值进行统计,同时为了评估模型产生的数据与实测的数据的偏差,计算了相对误差。由于模型中日温度和太阳辐射采用正态分布模拟,因此,用 t 检验和 F 检验对各站点实测数据和模拟数据的均值和标准差进行了检验,还采用 Wilcoxon 非参数秩和检验和 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验来检验实测数据和模拟数据是否来自于同一分布。值得注意的是, Wilcoxon 非参数秩和检验和 K-S 检验均为检验分布的标准方法,但 K-S 检验对于大样本的检验可能过于严格。同时还采用 QQ-plot 对实测

的和模拟数据的温度、太阳辐射和风速日值的百分位数(包括 5th、15th、25th、50th、75th、95th和 99th)与原始数据的比值在数值上进行了对比,计算并对比了实测和模拟最高温度、最低温度和太阳辐射数据序列的自相关和互相关系数。

3 结果与分析

3.1 非降水参数统计分析

CLIGEN 能很好的模拟日最高温度(表 2)。 t 检验和 F 检验表明所有站点实测数据和模拟数据的均值与标准差在 $P = 0.01$ 水平上差异不显著。实测数据和模拟数据的偏度系数绝对值均不大于 0.3, 根据 J. R. Evans 等^[12]的研究可以认为其分布是对称

的,并且偏度系数非常接近且近于零,同时,峰度系数也相等或非常接近。结果表明,最高温度服从正态分布的假设是合理的。12 个站点全时段最高温度的最大值平均差值为 2.3 °C,最大差值为 5.5 °C (西安)。Wilcoxon 非参数秩和检验和 K-S 检验表明实测数据序列和模拟数据序列的累积分布差异不显著($P = 0.01$),不能否定 2 组数据来自于同一分布。按月对 12 个站点实测数据和模拟数据分别作 t 检验和 F 检验,144 组数据均值与标准差均没有达到显著水平,说明各月数据的均值和标准差也能很好模拟,对其做进一步的 Wilcoxon 非参数秩和检验和 K-S 检验,144 组数据差异均不显著($P = 0.01$),不能否定实测和模拟的月最高温度也分别来自于同一分布。

表 2 日最高温度统计分析

Tab.2 Statistics of daily maximum temperature by site

站点		均值/°C	标准差/°C	偏度系数	峰度系数	全时段最大值/°C	t 检验 P 值	Wilcoxon 检验 P 值	K-S 检验 P 值
天水	M	16.9	9.8	-0.2	1.9	38.2	0.835	0.704	0.012
	C	16.9	9.8	-0.2	1.9	40.9			
长武	M	15.1	10.3	-0.2	1.9	37.6	0.984	0.670	0.013
	C	15.1	10.3	-0.1	2.0	40.6			
西安	M	19.3	10.7	-0.1	1.9	41.8	0.993	0.627	0.011
	C	19.3	10.7	-0.1	2.0	47.3			
延安	M	17.3	10.8	-0.3	1.9	39.7	0.989	0.592	0.012
	C	17.3	10.8	-0.2	2.0	42.4			
西宁	M	13.7	9.2	-0.3	2.1	36.5	0.978	0.638	0.146
	C	13.7	9.2	-0.2	2.1	36.8			
兰州	M	16.6	10.5	-0.2	1.9	39.8	0.961	0.589	0.034
	C	16.6	10.5	-0.2	1.9	42.7			
固原	M	13.0	10.0	-0.2	2.0	34.6	0.991	0.637	0.016
	C	13.0	10.0	-0.2	2.1	37.3			
太原	M	16.9	10.9	-0.3	1.8	39.4	0.999	0.567	0.073
	C	16.9	10.9	-0.3	1.9	40.5			
银川	M	15.8	11.7	-0.3	1.9	39.3	0.993	0.649	0.270
	C	15.8	11.7	-0.3	1.9	40.5			
东胜	M	12.0	12.1	-0.3	1.9	35.3	0.990	0.724	0.291
	C	12.0	12.1	-0.2	1.9	38.0			
呼和浩特	M	13.2	12.8	-0.3	1.9	38.5	0.823	0.588	0.575
	C	13.2	12.8	-0.3	1.9	39.2			
大同	M	13.9	12.3	-0.3	1.9	37.7	0.976	0.709	0.492
	C	13.9	12.3	-0.3	1.9	40.3			

注: M 为实测数据, C 为 CLIGEN 模拟数据, 以下均同。

CLIGEN 模拟的日最低温度等于或低于实测的日最低温度(表 3)。 t 检验表明 12 个站点仅有 1 个站点(西安)实测和模拟数据序列的均值差异极显著, 4 个站点(天水、长武、西安和东胜)均值差异显著。标准差、偏度系数和峰度系数没有使用范围控

制, 各站点都可以较好的模拟。 F 检验表明所有站点实测数据和模拟数据的标准差在 $P = 0.01$ 的显著性水平上差异不显著。实测数据和模拟数据的偏度系数绝对值均不大于 0.2, 可以认为其分布是对称的, 同时, 峰度系数也相等或非常接近; 因此, 可以认

为最低温度服从正态分布的假设也是合理的。12 个站点全时段最低温度的最小值的平均差值为 2.6 °C,最大差值为 5.5 °C(大同)。Wilcoxon 非参数秩和检验和 K-S 检验表明 12 个站点分别有 2 个站点(西安和东胜)和 1 个站点(西安)实测数据和模拟数据的分布差异极显著,否定了其服从同一分布的假设。按月对 12 个站点实测数据和模拟数据分别作 *t* 检验、*F* 检验和 Wilcoxon 秩和检验表明,144 组

数据中分别有 6 组、6 组和 8 组数据差异极显著。以上结果表明:除个别站点外,不能否定实测数据和模拟数据来自于同一分布。同时,从 *t* 检验和 Wilcoxon 非参数秩和检验可以看出,CLIGEN 对最低温度的模拟效果具有地区差异性,黄土高原南部(天水、长武和西安)模拟较差,而其中部和北部的模拟情况较好(东胜除外)。

CLIGEN 对日露点温度的模拟也较最高温度模

表 3 日最低温度统计分析

Tab.3 Statistics of daily minimum temperature by site

站点		均值/°C	标准差/°C	偏度系数	峰度系数	全时段最小值/°C	<i>t</i> 检验 <i>P</i> 值	Wilcoxon 检验 <i>P</i> 值	K-S 检验 <i>P</i> 值
天水	M	6.3	8.8	-0.2	1.9	-19.2	0.048	0.032	0.012
	C	6.2	8.8	-0.1	1.9	-18.7			
长武	M	4.2	9.7	-0.2	2.0	-25.2	0.028	0.013	0.014
	C	4.0	9.7	-0.1	1.9	-23.1			
西安	M	9.0	9.6	-0.1	1.8	-20.6	0.005	0.003	0.002
	C	8.7	9.6	0	1.8	-16.0			
延安	M	3.9	10.6	-0.2	1.9	-25.4	0.279	0.187	0.012
	C	3.8	10.6	-0.2	1.9	-27.4			
西宁	M	0.1	9.5	-0.3	1.9	-26.6	0.657	0.591	0.146
	C	0.1	9.5	-0.3	1.9	-26.9			
兰州	M	4.0	10.1	-0.3	1.9	-21.7	0.409	0.334	0.034
	C	4.0	10.1	-0.2	1.9	-24.4			
固原	M	0.7	10.0	-0.3	2.0	-30.9	0.170	0.087	0.016
	C	0.5	10.0	-0.2	1.9	-28.8			
太原	M	3.6	11.0	-0.2	1.9	-25.5	0.402	0.309	0.431
	C	3.6	11.0	-0.2	1.9	-28.1			
银川	M	2.8	11.4	-0.2	1.9	-30.6	0.368	0.306	0.112
	C	2.8	11.4	-0.2	1.9	-29.7			
东胜	M	1.0	11.5	-0.2	1.9	-29.8	0.013	0.008	0.014
	C	0.7	11.5	-0.2	1.8	-33.0			
呼和浩特	M	0.4	12.2	-0.2	1.9	-31.2	0.131	0.111	0.036
	C	0.2	12.3	-0.2	1.9	-36.2			
大同	M	0.6	12.1	-0.2	1.9	-29.1	0.264	0.237	0.053
	C	0.5	12.1	-0.2	1.9	-34.6			

拟差(表 4),主要是由于模型中利用日最低温度的标准差计算露点温度(式(3))所导致。*t* 检验表明 12 个站点有 2 个站点(长武和西安)实测和模拟数据序列差异极显著,4 个站点(天水、长武、西安和东胜)差异显著,其余站点均值差异不显著。实测数据和模拟数据的偏度系数绝对值均不大于 0.2,可以认为其分布是对称的,并且,实测数据和模拟数据的

偏度系数非常接近且近于零,峰度系数也相等或非常接近。这些结果表明,露点温度服从正态分布的假设是基本合理的。12 个站点全时段露点温度的最大值的平均差值为 2.1 °C,最大差值为 3.3 °C(兰州)。Wilcoxon 非参数秩和检验和 K-S 检验表明 12 个站点中分别有 3 个站点(天水、长武、西安)和 9 个站点实测数据和模拟数据分布的差异达到了极显著

水平,否定了其来源于同一分布的假设。同时,从 t 检验和 Wilcoxon 非参数秩和检验可以看出,CLIGEN 对露点温度的模拟也具有与最低温度相类似的地区

差异性,黄土高原南部(天水、长武和西安)模拟较差,实测数据与模拟数据差异均达到显著水平,而其中部和北部的模拟情况较好。

表 4 日露点温度统计分析

Tab.4 Statistics of daily dew temperature by site

站点		均值/℃	标准差/℃	偏度系数	峰度系数	全时段最大值/℃	t 检验 P 值	Wilcoxon 检验 P 值	K-S 检验 P 值
天水	M	4.9	9.3	-0.2	1.9	23.0	0.019	0.002	<0.000 1
	C	4.7	9.4	-0.1	1.9	25.8			
长武	M	3.4	10.4	-0.2	1.9	22.1	0.002	0.000 1	<0.000 1
	C	3.1	10.3	-0.1	1.9	25.6			
西安	M	8.0	9.8	-0.2	1.9	27.0	0.000 5	<0.000 1	<0.000 1
	C	7.7	9.8	-0.1	1.9	29.8			
延安	M	2.3	11.4	-0.2	2.0	23.5	0.132	0.020	<0.000 1
	C	2.2	11.1	-0.1	1.9	26.2			
西宁	M	-2.3	10.0	-0.2	1.7	17.6	0.930	0.895	0.045 0
	C	-2.3	10.0	-0.1	1.8	19.1			
兰州	M	1.2	9.9	-0.1	1.8	20.7	0.437	0.258	<0.000 1
	C	1.1	10.0	-0.1	1.9	24.0			
固原	M	-0.7	10.6	-0.2	1.9	20.0	0.129	0.035	<0.000 1
	C	-0.8	10.4	-0.1	1.9	22.5			
太原	M	1.9	12.1	-0.2	1.9	25.2	0.308	0.059	<0.000 1
	C	1.8	11.7	-0.1	1.8	26.4			
银川	M	0.7	11.4	-0.1	1.8	23.1	0.338	0.169	<0.000 1
	C	0.6	11.3	-0.1	1.8	24.4			
东胜	M	-4.3	11.8	0	1.9	20.5	0.014	0.045	<0.000 1
	C	-4.0	10.9	0.1	1.8	21.2			
呼和浩特	M	-2.5	12.3	0	1.8	22.3	0.352	0.839	0.025 0
	C	-2.4	11.7	0.1	1.8	23.6			
大同	M	-2.6	12.5	0	1.8	21.9	0.111	0.321	0.013 0
	C	-2.4	11.9	0.1	1.8	24.3			

CLIGEN 对太阳辐射的模拟较差(表 5)。模型中没有使用实测太阳辐射标准差来模拟太阳辐射,而是先通过站点的纬度和当年的天数计算日可能最大太阳辐射,然后采用式(5)计算太阳辐射的标准差。通过这种方式计算出来的太阳辐射标准差与近地面实测太阳总辐射标准差是有差异的,因此,使用实测的太阳总辐射标准差进行模拟可能会改善其模拟效果。 t 检验表明 11 个站点(长武无太阳辐射实测数据)中有 6 个站点(西宁、太原、银川、东胜、呼和浩特和大同)实测和模拟数据序列差异极显著;实测数据的标准差要显著大于模拟数据的标准差, F 检验表明所有站点两者标准差均达到了极显著的水

平,进一步表明利用式(5)计算太阳辐射的标准差是导致其模拟较差的主要原因。同时,模拟的偏度系数要大于实测数据的偏度系数(兰州二者相等),表明模拟的分布较实测数据左偏,模拟的峰度系数也较实测数据偏大(西宁除外)。10 个站点(西宁除外)所有时段太阳辐射最大值的平均差值为 2.8 MJ/($m^2 \cdot d$),最大差值为 44.2 MJ/($m^2 \cdot d$)(西宁)。Wilcoxon 非参数秩和检验和 K-S 检验表明 11 个站点中分别有 4 个站点(西安、兰州、银川和呼和浩特)和 8 个站点实测数据和模拟数据分布达到了极显著的水平,否定了其服从同一分布的假设。

CLIGEN 不能较好的模拟各站点的日平均风速

(表 6)。模拟的均值和标准差都显著的大于实测数据。12 个站点均值的相对误差范围为 $-123.1\% \sim -124.0\%$, 平均相对误差为 -123.5% , 标准差的相对误差范围为 $-123.9\% \sim -126.7\%$, 平均相对误差为 -124.9% 。均值和标准差的误差均非常大。实测数据的偏态分布为左偏, 这种趋势能较好的模

拟出来; 模拟数据的峰度系数均要大于实测数据, 出现较大的尖峰。12 个站点所有时段风速最大值的平均差值为 17.1 m/s , 模拟效果很差。Wilcoxon 非参数秩和检验和 K-S 检验表明, 12 个站点实测数据和模拟数据的分布均达到了极显著的水平, 完全否定了其来源于同一分布的假设。

表 5 日太阳辐射统计分析

Tab.5 Statistics of daily solar radiation by site

站点		均值	标准差	偏度系数	峰度系数	全时段最大值	t 检验 P 值	Wilcoxon 检验 P 值	K-S 检验 P 值
天水	M	14.5	9.1	0.2	2.1	35.8	0.669	0.314	<0.000 1
	C	14.4	5.7	0.6	2.8	34.0			
长武	M	-	-	-	-	-	-	-	-
	C	13.8	5.6	0.6	2.7	33.8			
西安	M	12.3	7.7	0.3	2.1	42.8	0.800	<0.000 1	<0.000 1
	C	12.2	5.4	0.6	2.6	33.7			
延安	M	13.7	7.4	0.3	2.2	34.7	0.979	0.045	<0.000 1
	C	13.7	5.8	0.6	2.7	34.1			
西宁	M	16.1	7.4	0.3	2.6	78.3	<0.000 1	0.828	0.028
	C	15.8	5.9	0.4	2.5	34.1			
兰州	M	14.5	8.0	0.4	2.3	41.6	0.479	<0.000 1	<0.000 1
	C	14.5	6.2	0.4	2.4	33.8			
固原	M	15.1	7.7	0.1	2.3	32.6	0.086	0.304	<0.000 1
	C	15.0	5.5	0.5	2.8	34.1			
太原	M	14.6	7.4	0.2	2.2	35.4	0.217	0.751	0.011
	C	14.5	5.9	0.5	2.6	34.2			
银川	M	16.5	7.5	0.2	2.1	34.1	<0.000 1	<0.000 1	0.011
	C	16.2	6.5	0.4	2.3	34.2			
东胜	M	16.0	7.2	0.2	2.0	32.5	0.005	0.012	<0.000 1
	C	15.8	6.4	0.4	2.3	34.3			
呼和浩特	M	16.9	7.9	0.1	2.1	36.1	0.000 4	0.001	<0.000 1
	C	16.3	6.9	0.4	2.2	34.2			
大同	M	15.5	7.6	0.3	2.2	36.5	0.001	0.145	<0.000 1
	C	15.3	6.4	0.4	2.4	34.2			

注: 日太阳辐射均值、标准差和全时段最大值的单位为 $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

3.2 日温度变化范围评估

黄土高原 12 站点实测数据, 模拟数据的日温度变化范围统计检验见表 7。可以看出: 模型过高的模拟了温度日较差、第 1 天最高温度与第 2 天最低温度之差、第 2 天最高温度与第 1 天最低温之差的均值和标准差, 均值的平均相对误差均为 -1.2% , 标准差的平均相对误差分别为 -30.0% 、 -55.0% 和 -17.8% 。这主要是由模拟值中大量的负值数所引起的, 但均值的误差较小, 模拟效果相对较好, 而

标准差被过高的模拟。

由于对最低温度实行了范围控制, 因此, 在同一天最高温度总是高于最低温度。温度的变化是一个渐变和连续的过程, 因此很少出现第 1 天最低温度高于第 2 天最高温度的现象, 也很少出现第 2 天最低温度高于第 1 天最高温度的现象, 从黄土高原 12 个站点的实测数据也可以看到这一点。但是, 从表中的负值数可以看出(表 7 中所用实测数据序列为 50 年左右, 而模拟数据序列均为 100 年): 通过

表 6 日风速统计分析
Tab.6 Statistics of daily wind velocity by site

站点		均值/(m·s ⁻¹)	标准差/(m·s ⁻¹)	偏度系数	峰度系数	全时段最大值/(m·s ⁻¹)	Wilcoxon 检验 P 值	K-S 检验 P 值
天水	M	1.1	0.8	1.4	6.6	6.8	<0.000 1	<0.000 1
	C	2.4	1.7	1.5	8.0	20.5		
长武	M	2.3	1.1	0.7	4.0	9.8	<0.000 1	<0.000 1
	C	5.1	2.4	0.7	4.3	24.5		
西安	M	1.7	1.2	1.2	5.4	12.5	<0.000 1	<0.000 1
	C	3.7	2.7	1.3	6.2	33.9		
延安	M	1.7	0.8	0.2	3.0	5.8	<0.000 1	<0.000 1
	C	3.7	1.7	0.3	3.3	14.2		
西宁	M	1.5	1.1	1.3	5.8	9.0	<0.000 1	<0.000 1
	C	3.3	2.4	1.4	6.3	24.3		
兰州	M	0.9	0.8	1.0	4.1	6.3	<0.000 1	<0.000 1
	C	2.0	1.7	1.1	5.2	22.1		
固原	M	2.8	1.3	1.0	4.6	11.3	<0.000 1	<0.000 1
	C	6.2	2.9	1.0	5.2	31.3		
太原	M	2.1	1.3	1.3	5.6	11.0	<0.000 1	<0.000 1
	C	4.7	2.9	1.4	6.6	32.3		
银川	M	2.1	1.2	1.3	6.3	10.8	<0.000 1	<0.000 1
	C	4.7	2.8	1.3	6.9	30.1		
东胜	M	3.1	1.4	0.8	4.2	11.0	<0.000 1	<0.000 1
	C	6.9	3.1	0.9	4.5	29.8		
呼和浩特	M	1.8	1.4	1.3	5.5	11.6	<0.000 1	<0.000 1
	C	4.1	3.0	1.4	6.3	28.5		
大同	M	2.8	1.5	1.3	6.1	15.0	<0.000 1	<0.000 1
	C	6.4	3.4	1.3	6.2	34.5		

CLIGEN 模拟的数据大量的出现了这 2 种情况,说明 CLIGEN 不能较好的模拟温度的连续性和渐变性的,这主要是由于最高温度和最低温度是独立产生的,同时模型中没有考虑逐日温度的连续性。

3.3 累积分布的评估

百分位数可以描述样本的累积分布状况。图 1 利用百分位数给出了黄土高原有代表性的 6 个标准气象站点(西安、天水、长武、延安、太原和兰州)各气象要素(日最高、最低、露点温度,太阳辐射和风速)的累积分布图,为了便于比较,将实测数据和 CLIGEN 模拟数据的百分位数都除以实测数据的均值。如果数据点落到 1:1 直线上,表明 CLIGEN 模拟数据的分布在该百分位上的数值要比实测数据偏高,反之则偏低。

从图中可以看出,除了风速以外,其他所有百分位数与 1:1 直线较接近,特别是最高、最低温度,均

落在 1:1 直线之上,模拟效果非常好。模型较高的模拟了兰州、天水和西安 3 站点大于 95th 的露点温度;同时,模型对天水和西安太阳辐射的模拟,小百分位数偏大,大百分位数偏小,但差异都不是很明显。基本上可以认为各站点除风速以外各变量的分布都能较好的模拟。模型对最小温度的范围控制没有显著的改变他们的分布。

模型过高的模拟了各站点风速,并且随着分布百分位的增大,模拟值的增幅也增大。这与 Zhang^[8] 对美国俄克拉荷马州若干站点的模拟结果相类似。

3.4 相关性评估

使用原始数据进行相关性研究时,最高温度、最低温度和太阳辐射自相关和互相关都呈现出一年的振荡周期,表明实测的和产生的温度具有明显的季节起伏。图 2 给出了最大滞后时间为 40 d 的自相关和互相关图。由于各研究站点各要素的相关性具有

表 7 日温度变化范围(°C)统计检验
 Tab.7 Statistics of diurnal temperature range (°C) for measured and CLIGEN-generated data

站点	统计量	$t_{\max1} - t_{\min1}$		$t_{\max1} - t_{\min2}$		$t_{\max2} - t_{\min1}$	
		M	C	M	C	M	C
天水	均值	10.6	10.7	10.6	10.7	10.6	10.7
	标准差	4.4	5.0	3.9	5.4	4.8	5.4
	负值数	0	0	0	770	0	852
长武	均值	10.9	11.1	10.9	11.1	10.9	11.1
	标准差	4.7	5.4	4.2	5.8	5.2	5.7
	负值数	0	0	0	936	0	981
西安	均值	10.4	10.6	10.3	10.6	10.4	10.6
	标准差	4.4	5.2	4.1	5.7	4.9	5.7
	负值数	0	0	0	1 038	8	1 084
延安	均值	13.3	13.4	13.3	13.4	13.3	13.4
	标准差	5.2	5.9	4.6	6.1	5.6	6.1
	负值数	0	0	0	476	3	513
西宁	均值	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6
	标准差	4.6	5.3	3.9	5.4	5.0	5.4
	负值数	0	0	0	197	0	227
兰州	均值	12.6	12.7	12.6	12.7	12.6	12.7
	标准差	4.2	5.2	3.6	5.4	4.7	5.4
	负值数	0	0	0	347	0	387
固原	均值	12.4	12.5	12.4	12.5	12.3	12.5
	标准差	4.8	5.7	4.2	6.0	5.3	6.0
	负值数	0	0	0	647	5	701
太原	均值	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3
	标准差	4.7	5.7	3.9	5.9	5.2	5.9
	负值数	0	0	0	342	4	397
银川	均值	12.9	13.0	12.9	13.0	12.9	13.0
	标准差	4.2	5.7	3.6	5.9	4.9	5.9
	负值数	0	0	0	477	2	544
东胜	均值	11.0	11.2	11.0	11.2	11.0	11.2
	标准差	3.2	5.8	3.2	6.3	4.5	6.3
	负值数	1	0	0	1 288	9	1 320
呼和浩特	均值	12.9	13.0	12.9	13.0	12.9	13.0
	标准差	4.0	6.0	3.4	6.3	4.9	6.3
	负值数	0	0	0	738	4	774
大同	均值	13.3	13.4	13.3	13.4	13.3	13.4
	标准差	4.1	6.1	3.5	6.4	5.1	6.4
	负值数	0	0	0	638	3	665

注: $t_{\max1}$ 为第 1 天的最高温度, $t_{\min1}$ 为第 1 天的最低温度, $t_{\max2}$ 为第 2 天的最高温度, $t_{\min2}$ 为第 2 天的最低温度。

相似的结果,因此,文中仅列出了天水站非降水参数的相关图。

自相关分析表明:实测气象要素的自相关系数呈现短期相关的趋势。最高温度存在着 4 d 的短期相关,就是说如果某一天的最高气温低于平均最高气温,那么紧接着的第 1、2、3 或 4 天的最高气温也

低于其平均最高气温。最低气温的短期相关周期为 4 d,太阳辐射为 2 d。但是,CLIGEN 模拟的数据没有保持天与天之间的短期相关性,这主要是由模型中每天数据是独立产生所导致的。实测数据最高温度(t_{\max})和最低温度(t_{\min})的自相关系数略高于 CLIGEN 模拟数据,但差异不是很明显,说明 CLIGEN 可

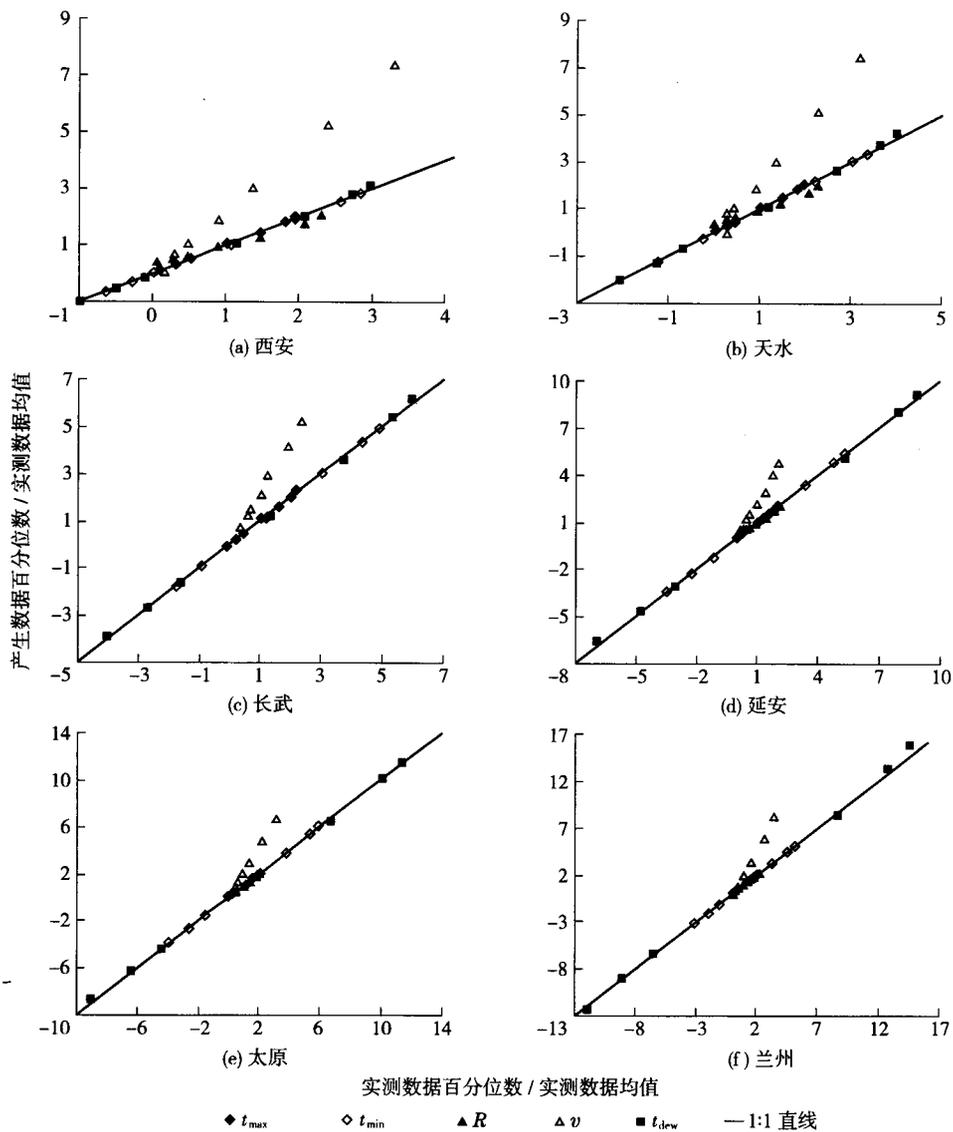


图 1 实测和产生数据的 5th, 15th, 25th, 50th, 75th, 95th, 99th百分位数 (均除以相应变量实测数据均值)

Fig.1 Plots of 5, 15, 25, 50, 75, 95 and 99 percentiles of measured vs. generated daily weather data (all scaled by the corresponding measured mean of daily weather data)

以较好的模拟最高温度、最低温度的季节相关性。而模拟太阳辐射的自相关系数要普遍高于实测值, 表明 CLIGEN 模拟的太阳辐射较实际情况具有更强的季节相关性。

互相关分析表明: 对于实测的气象要素, 最高温度和最低温度在 4 d 内具有相关性, 表明了温度变化的连续性; 最高温度和太阳辐射、最低温度与太阳辐射的具有相关性周期分别为 5 和 2 d。CLIGEN 产生的气象要素之间没有保持短期互相关, 主要是由模型中对各气象要素的独立性假设引起的; 同时, 实测数据 $t_{\max} - t_{\min}$ 的互相关系数略高于 CLIGEN 模拟

数据, 但差异也不是很明显, 表明 CLIGEN 可以较好的模拟 $t_{\max} - t_{\min}$ 的季节相关性。而模拟的温度与太阳辐射之间的相关系数普遍高于实测数据, 这可能是由模型过高的模拟太阳辐射的自相关所导致的。

从自相关和互相关分析的结果可以知道, CLIGEN 产生的最高、最低温度和太阳辐射具有较好的季节性, 虽然数值上较实测数据有所差距, 但是都很好保持了其季节变化的总体趋势; 但是, CLIGEN 没有模拟出各气象要素自身及其之间的逐日相关性, 主要原因是 CLIGEN 将每个气象要素作为单独

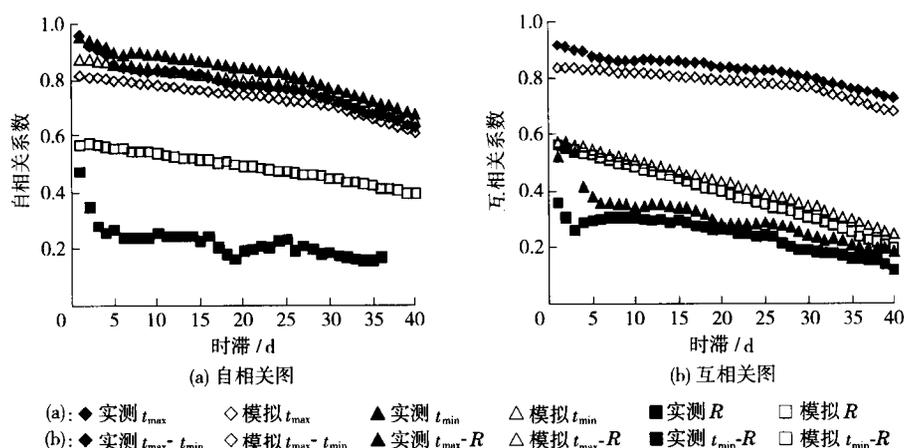


图 2 实测和 CLIGEN 模拟数据日天气变量的相关图(天水站)

Fig.2 Correlograms of measured and CLIGEN generated daily weather variables (Tianshui station)

的变量进行模拟,并且每天的数据是单独产生的。

4 结论

1) CLIGEN 能较好的模拟日最高温度;对日最低温度与露点温度的模拟次之;模型对太阳辐射和风速的模拟较差,特别是对风速的模拟,模拟值要显著的高于实测值。

2) CLIGEN 模拟的 $t_{max1} - t_{min1}$ 、 $t_{max1} - t_{min2}$ 、 $t_{max2} - t_{min1}$ 的均值和标准差普遍偏高,但均值的误差较小,而标准差被过高的模拟。模型在产生气候数据时,没有保持逐日渐变性和连续性,出现了第 1 天最低温度高于第 2 天最高温度和第 2 天最低温度高于第 1 天最高温度的现象。

3) CLIGEN 能较好地模拟最高温度与最低温度的季节连续性与相关性,而过高地模拟了太阳辐射的季节相关性以及温度与太阳辐射的季节互相关性,同时,模型没有模拟出各气象要素自身及其之间的逐日相关性。

中国气象科学数据共享服务网和黄土高原水土保持数据库提供了数据,深表感谢。

5 参考文献

[1] Richardson C W, Wright D A. WGEN: A model for generating daily weather variables. Washington D C: USDA-ARS Publ. ARS-8,1984
 [2] Hanson C L, Cumming K A, Woolhiser D A, et al. Micro-computer program for daily weather simulations in the contiguous United States. Washington D C: USDA-ARS Publ. ARS-114, 1994

[3] Nicks A D, Lane L J, Gander G A. Weather generator, Ch. 2. Washington D C: USDA-ARS-NSERL, 1995
 [4] Baffault C, Nearing M A, Nicks A D. Impact of CLIGEN parameters on WEPP-predicted average annual soil loss. Transactions of the ASAE, 1996, 39(2): 447-457
 [5] Zhang X C. Assessing seasonal climatic impact on water resources and crop production using CLIGEN and WEPP models. Transactions of the ASAE, 2003,46(3): 685-693
 [6] Zhang X C, Liu W Z. Simulating potential response of hydrology, soil erosion, and crop productivity to climate change in Changwu tableland region on the Loess Plateau of China. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 131(3/4): 127-142
 [7] Johnson G L, Hanson C L, Hardegree S P, et al. Stochastic weather simulation: overview and analysis of two commonly used models. Applied Meteorology, 1996, 35(10): 1878-1896
 [8] Zhang X C. CLIGEN non-precipitation parameters and their impact on WEPP crop simulation. Applied Engineering in Agriculture, 2004, 20(4): 447-454
 [9] 缪驰远, 何丙辉, 陈晓燕, 等. WEPP 模型中的 CLIGEN 与 BPCDG 应用对比研究. 中国农学通报, 2004, 20(6): 321-324
 [10] 张光辉. CLIGEN 天气发生器在黄河流域的适应性研究. 水土保持学报, 2004, 18(1): 175-178
 [11] 史婉丽, 杨勤科, 穆婉红. 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, 2006, 4(2): 18-23
 [12] Evans J R, Olson D L. Introduction to Simulation and Risk Analysis. 2nd ed. Upper Saddle River, N J: Prentice Hall, 2002

(责任编辑:程云)