

# WXGEN 天气发生器在长江上游地区的适用性评价

胡云华<sup>1,2</sup>, 贺秀斌<sup>1</sup>, 唐强<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** WXGEN 天气发生器是 SWAT 分布式流域水文模型的组成模块之一, 用于模型预测预报以及天气数据缺测时生成模拟天气数据。以长江上游 5 个典型国家气象站 40 a 的日观测数据为基础, 分析评价了 WXGEN 天气发生器在该地区模拟的日和月气象参数的精度。结果表明, WXGEN 天气发生器在长江上游 5 个典型气象站模拟精度基本一致; 模拟的日天气数据误差较大; 模拟的月天气数据效果好于日天气数据, WXGEN 天气发生器能较好地拟合月天气数据的分布, 更适用于长江上游地区月气象参数的模拟, 但 WXGEN 模拟的月天气数据误差具有较强的季节规律性, 月降雨量和气温的模拟值较实际值偏低, 而太阳辐射量模拟值却较实际值偏高。

**关键词:** SWAT; 天气发生器; WXGEN; 长江上游

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2014)01-0284-06

中图分类号: P332.1, P468.03

## Applicability Assessment of WXGEN Weather Generator Used in Upper Yangtze River

HU Yun-hua<sup>1,2</sup>, HE Xiu-bin<sup>1</sup>, TANG Qiang<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards &amp; Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The WXGEN weather generator is a component of the soil and water assessment tool (SWAT), which is applied as a hydrological model at catchment scale and applied to forecast weather condition and fill the missing weather data. This paper analyzes and assesses the precision of the daily and monthly weather data based on the comparison between the data simulated by the WXGEN and the daily observed data according to 5 national meteorological stations in the upper Yangtze River. Results indicate that the WXGEN generated data are generally in consistence with those from the five stations. The errors of daily data simulated by WXGEN are significant, while the monthly data are more accurate than those of daily data. In conclusion, WXGEN has better simulation of the distribution of monthly weather data and hence it is more suitable for the simulation of monthly weather data in the Upper Yangtze River. Yet the errors of the simulated monthly weather data demonstrate significant seasonal changes. The simulated monthly precipitation and temperature are lower than the observed values, while the average monthly solar radiation is above the observed value.

**Keywords:** SWAT; weather generator; WXGEN; upper Yangtze River

天气发生器是为水文和农作物生长等模型提供模拟天气数据的模型, 一般情况下, 模型都直接使用实际观测数据进行运算, 但是在研究区气象数据缺乏或者不完整的情况下, 特别是进行预测预报时, 模型将利用天气发生器生成所需的天气数据<sup>[1]</sup>。常见的天气发生器有 WXGEN, CLIGEN, WGEN, USCLI-

MATE 等, 其优点在于可以利用较少的统计数据来模拟长时间的气象数据<sup>[2]</sup>。但天气发生器主要的缺点在于模拟结果在不同地区或者时段具有很大的不确定性, 而且现有的大部分天气发生器都是基于美国的天气特征研发的, 原则上在将模型应用于其他地区之前, 都应该进行适用性评价, 以确定所模拟的天气

收稿日期: 2013-04-15

修回日期: 2013-04-25

资助项目: 国家自然科学基金项目“三峡消落带干湿交替条件下土壤微结构变化特征”(41171222); 中国科学院西部行动计划项目“三峡库区水土流失与面源污染控制实验示范”(KZCX2-XB3-09); 国家科技支撑计划课题“三峡库区低产坡地改造与面源污染减控技术集成与示范”(2011BAD31B03)

作者简介: 胡云华(1988—), 男(汉族), 四川省自贡市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀模型和 3S 技术在水土保持研究中的应用。E-mail: huyunhua1@163.com。

数据的可靠性<sup>[3]</sup>。以 WEPP 模型所使用的 CLIGEN 天气发生器为例,随着 WEPP 模型在国内应用的增加,何炳辉等<sup>[4]</sup>、陈杰等<sup>[5]</sup>、张光辉<sup>[6]</sup>、范正成等<sup>[7]</sup>曾对 CLIGEN 天气发生器在中国紫色土地区、黄土高原地区、台湾地区的适用性进行了评价。WXGEN 是 SWAT 模型和 EPIC 模型所使用的天气发生器<sup>[8-9]</sup>,它最早是基于 Richardson 等<sup>[10]</sup>所研发的天气发生器建立起来的。由于 WXGEN 天气发生器不像 CLEGEN 天气发生器有单独开发的视窗程序,模型的调用和结果的读取都比较复杂,目前 WXGEN 天气发生器只在全球少数地区进行过适应性评价<sup>[11]</sup>, Trevor 等<sup>[12]</sup>曾利用德克萨斯州 5 个气象站的数据对 EPIC 模型中的 WXGEN 天气发生器进行评价,结果认为 WXGEN 天气发生器生成的天气数据并不可靠,使用其生成的数据可能会对 EPIC 模型运行的结果有较大的影响。Hayhoe 等<sup>[13]</sup>曾利用加拿大境内 5 个气象站数据对 WXGEN 和 CLIGEN 两个天气发生器的适用性进行了对比评价,结果表明,两种天气发生器模拟的表现各有优劣,相对于 CLIGEN, WXGEN 能更好地吻合实测天气数据的频率分布,保持了各因子之间的相关性。

目前,SWAT<sup>[14-16]</sup>模型和 EPIC<sup>[17-19]</sup>模型在国内已经有大量应用,但是模型当中的 WXGEN 天气发生器还从未在国内进行过适用性评价,本文从长江上游地区选择了 5 个不同地貌区的国家气象站,利用气象站 40 a 的日观测数据对 SWAT 模型中的 WXGEN 天气发生器进行运算和结果检测,由于 SWAT 模型可以直接查看的天气数据参数有限,本研究只对模型模拟的日和月降雨量、平均气温、最高气温、最低气温、太阳辐射量 5 个重要的水文气象参数进行精度评价,其目的在于评价 WXGEN 天气发生器在长江上游地区的适用性,为该地区 SWAT 和 EPIC 模型的应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 WXGEN 的基本原理

降雨的发生对相对湿度、太阳辐射和温度均有重要影响。因此, WXGEN 天气发生器首先独立地模拟某一天的降水和风速,然后模拟最高和最低温度、太阳辐射和相对湿度。降雨模拟采用马科夫链,马科夫链可以定义某一天是干日还是湿日,当确定为湿日时,则用偏态马科夫链模型来模拟日降水量,偏态马科夫链是基于 Fiering 的典型径流偏态分布方程来建立的,公式为:

$$R_{\text{day}} = \mu_{\text{mon}} + 2 \cdot \sigma_{\text{mon}} \cdot \left[ \frac{((\text{SND}_{\text{day}} - \frac{g_{\text{mon}}}{6}) \cdot (\frac{g_{\text{mon}}}{6}) + 1)^3 - 1}{g_{\text{mon}}} \right] \quad (1)$$

式中:  $R_{\text{day}}$ ——某一天的降水量(mm);  $\mu_{\text{mon}}$ ——该月份的日均降水量(mm);  $\sigma_{\text{mon}}$ ——该月日降水量的标准差;  $\text{SND}_{\text{day}}$ ——某一天的标准正态偏离量;  $g_{\text{mon}}$ ——该月日降水的偏态系数。最高温度、最低温度和太阳辐射的模拟则是基于 Matalas 发表的弱平稳过程模型,利用残差元素与月标准差相乘,并与月平均值相加而得,计算公式如下:

$$T_{\text{mx}} = \mu_{\text{mx}_{\text{mon}}} + \chi_{i_1} \cdot \sigma_{\text{mx}_{\text{mon}}} \quad (2)$$

$$T_{\text{mn}} = \mu_{\text{mn}_{\text{mon}}} + \chi_{i_2} \cdot \sigma_{\text{mn}_{\text{mon}}} \quad (3)$$

$$H_{\text{day}} = \mu_{\text{rad}_{\text{mon}}} + \chi_{i_3} \cdot \sigma_{\text{rad}_{\text{mon}}} \quad (4)$$

式中:  $T_{\text{mx}}$ ——最高温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $\mu_{\text{mx}_{\text{mon}}}$ ——月最高温度平均值( $^{\circ}\text{C}$ );  $\chi_{i_1}$ ——某一天最高温度残差( $^{\circ}\text{C}$ );  $\sigma_{\text{mx}_{\text{mon}}}$ ——该月的日最高温度标准差;  $T_{\text{mn}}$ ——最低温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $\mu_{\text{mn}_{\text{mon}}}$ ——月最低温度平均值( $^{\circ}\text{C}$ );  $\chi_{i_2}$ ——在某一天最低温度残差( $^{\circ}\text{C}$ );  $\sigma_{\text{mn}_{\text{mon}}}$ ——该月的日最低温度标准差;  $H_{\text{day}}$ ——日太阳辐射( $\text{MJ}/\text{m}^2$ );  $\mu_{\text{rad}_{\text{mon}}}$ ——月太阳辐射的平均值( $\text{MJ}/\text{m}^2$ );  $\chi_{i_3}$ ——在某一天太阳辐射的残差( $\text{MJ}/\text{m}^2$ );  $\sigma_{\text{rad}_{\text{mon}}}$ ——该月的日太阳辐射标准差<sup>[1]</sup>。

### 1.2 数据选择与处理

为了能充分评价 SWAT 模型中的 WXGEN 天气发生器在长江上游不同地区的适用性,本研究以地貌类型为划分标准选择了川中红层切割台地地区的都江堰站、盆地东南断褶山地地区的重庆沙坪坝站、盆地西南断块山原地区的丽江站、高山岭谷地区的马尔康站、西部寒冻高原地区的托托河站 5 个气象站进行天气模拟和结果评价(表 1),其中都江堰和重庆沙坪坝站的气候类型属于亚热带湿润季风气候,丽江站、马尔康站和托托河站都属于高原季风气候,托托河站是世界上海拔最高的气象观测站。利用基于 ArcGIS 平台的 SWAT 模型建立了长江上游的 ArcSWAT 工程文件,通过 ArcSWAT 模型的运算,读取 WXGEN 天气发生器的模拟结果,并进行精度分析。WXGEN 天气发生器在进行天气模拟时,需要输入至少 30 a 的天气统计参数,主要的统计参数有:月平均最高气温、月平均最低气温、最高气温标准偏差、月平均降雨量、降雨量标准偏差、月内干日日数、露点温度、月平均太阳辐射量等。本研究利用北京师范大学开发的 SwatWeather.exe 工具对 WXGEN 模型所需要的各气象参数进行计算,统计了 5 个气象站 1971—2005 年 35 a 的天气统计参数,并将

参数导入工程文件中,运行模型生成 2001—2010 年各气象站每天的降雨、气温和太阳辐射数据,再和实

测结果进行比较分析,评价天气发生器模拟天气数据的效果。

表 1 各气象站的基本信息

站名	经度/ (°)	纬度/ (°)	高程/ m	时段	地貌类型	气候类型	多年平均 气温/°C	多年平均 降雨量/mm
都江堰	103.67	30.98	707	1954—2013	川中红层切割台地	亚热带湿润季风气候	15~17	1 243
沙坪坝	106.47	29.58	259	1951—2013	盆地东南断褶山地	亚热带湿润季风气候	16~18	1 096
马尔康	102.23	31.90	2 644	1953—2013	高山岭谷	高原大陆季风气候	8~9	765
丽江	100.22	26.87	2 392	1951—2013	盆地西南断块高原	高原型西南季风气候	13~20	978
托托河	92.43	34.20	4 533	1956—2013	西部寒冻高原	高原大陆季风气候	-4~4	342

### 1.3 评估方法

为了能量化天气发生器所产生的日、月各气象参数的精确度,利用绝对误差平均值和标准误差来评价天气发生器生成的天气数据的误差大小,利用误差标准差来评价误差的波动性。为了检验实测数据和模拟数据的分布情况,利用  $F$  检验来检验模拟数据和实测数据的方差是否相等,在数据满足方差相等的情况下,利用等方差双样本  $T$  检验来检验两组数据的平均数与其各自所代表的总体的差异是否显著,在数据不满足方差相等的情况下,利用异方差双样本  $T$  检验来检验两组数据的平均数与其各自所代表的总体的差异是否显著。由于很多气象数据可能不满足  $T$  检验正态分布的要求,因此使用不考虑数据分布特征的非参数检验方法 Mann—Whitney ( $M-W$ ) 检验和 Kolmogorov—Smirnov ( $K-S$ )  $Z$  检验方法来检验模拟数据和实测数据的分布是否存在差异,所有的检验取信度均设为 0.05。

## 2 结果与分析

### 2.1 日天气数据的模拟结果评价

从表 2 可以看出, WXGEN 模拟的 5 个气象站 10 a 日天气数据各种误差指标大体相似,说明该天气发生器在长江上游各气象站模拟的日天气数据的精度比较接近, WXGEN 模拟的 5 个气象站每日的平均气温的平均误差为  $\pm 2.6$  °C, 每日最高气温的平均误差为  $\pm 3.8$  °C, 每日最低气温的平均误差为  $\pm 2.5$  °C, 每日降水量的平均误差为  $\pm 3.19$  mm, 每日太阳辐射的平均误差为  $\pm 6.31$  MJ/m<sup>2</sup>。从误差的标准差来看, 每日降雨量和太阳辐射的误差波动较大, 而气温误差的波动相对较小。从数据的分布检验来看, 除个别气象站的个别气象参数外, 其他大部分参数没有通过  $F$  检验, 说明每日的气象数据方差不相等,  $T$  检验结果表明, 除了每日的平均气温外, 其他各项参数在

0.05 的显著水平下差异显著。从  $M-W$  和  $K-S$  非参数检验的结果来看, 除都江堰站、重庆沙坪坝站的日平均气温和马尔康站的日降雨量在  $M-W$  检验中满足 0.05 的显著水平下差异不显著外, 其他各参数均在 0.05 的显著水平下差异显著。综上所述, 各日气象参数的模拟效果排序依次为平均气温 > 最低气温 > 最高气温 > 降雨量 > 太阳辐射量。从总体效果来看, 各日气象参数的模拟结果误差较大, 和标准数据分布存在显著差异, 模拟结果可靠性比较差。

### 2.2 月天气数据的模拟结果评价

从表 3 可以看出, WXGEN 模拟的 5 个气象站 10 a 的月天气数据各种误差指标均比较接近, 说明该天气发生器在长江上游各气象站模拟的月天气数据的精度大体相当。5 个气象站每月的平均气温的平均误差为  $\pm 0.98$  °C, 每月的最高气温的平均误差为  $\pm 1.36$  °C, 每月的最低气温的平均误差为  $\pm 1.1$  °C, 每月的降水量的平均误差为  $\pm 32.76$  mm, 每月的太阳辐射量的平均误差为  $\pm 1.73$  MJ/m<sup>2</sup>。从误差的标准差来看, 月气温和太阳辐射的误差波动较小, 但月降雨量的误差波动较大。从总体而言, 天气发生器模拟的各项月天气数据误差小于日天气数据模拟的误差。从数据的分布检验来看, 5 个气象站月平均气温、最高气温、最低气温均在 0.05 的显著水平下方差相等,  $T$  检验,  $M-W$  检验和  $K-S$  检验在 0.05 的显著水平下差异不显著, 说明天气发生器对月气温数据的模拟效果较好。月降雨量数据不满足正态分布, 从非参数的  $M-W$  和  $K-S$  检验来看, 5 个气象站月降雨量的实测值和模拟值在 0.05 的显著水平下差异不显著。除都江堰站和丽江站的月平均太阳辐射量在 0.05 的显著水平下差异显著外, 其他 3 个气象站在 0.05 的显著水平下差异均不显著。综上, WXGEN 模拟各项月天气数据误差相对较小, 模拟精度较高, 模拟数据的分布和实测数据都较相似, 结果有一定的可靠性。

表 2 WXGEN 模拟的日天气数据各误差评定指标值

气象参数	站名	绝对误差 平均值	标准误差	误差 标准差	F 检验 $p$ 值	T 检验 $p$ 值	M—W 检验 $p$ 值	K—S 检验 $p$ 值
平均气温/ °C	都江堰	2.38	3.00	1.82	0.040	0.121	0.092	0
	丽江	2.15	2.75	1.72	0.019	0.103	0.040	0
	马尔康	2.78	3.49	2.11	0.295	0.613	0	0
	托托河	2.98	3.87	2.46	0	0.011	0.023	0.001
	沙坪坝	2.62	3.31	2.02	0.019	0.749	0.594	0.006
最高气温/ °C	都江堰	3.29	4.11	2.46	0.002	0	0	0
	丽江	3.30	4.13	2.48	0.017	0	0	0
	马尔康	4.47	5.56	3.30	0.954	0	0	0
	托托河	4.32	5.47	3.35	0	0	0	0
	沙坪坝	3.75	4.73	2.88	0	0.004	0.006	0
最低气温/ °C	都江堰	2.26	2.86	1.76	0.013	0	0	0
	丽江	2.31	2.93	1.80	0.001	0	0	0
	马尔康	2.50	3.07	1.79	0	0.005	0.001	0
	托托河	3.36	4.31	2.71	0.656	0	0	0
	沙坪坝	2.17	2.76	1.70	0.001	0.002	0	0
降雨量/ mm	都江堰	4.39	12.22	11.4	0.120	0.787	0	0
	丽江	3.40	8.07	7.32	0	0.002	0	0
	马尔康	2.62	5.55	4.89	0	0	0.258	0
	托托河	1.10	2.92	2.71	0	0	0	0
	沙坪坝	4.45	12.18	11.34	0	0.015	0	0
太阳辐射量/ (MJ·m <sup>-2</sup> )	都江堰	5.73	7.16	4.29	0	0	0	0
	丽江	6.78	8.65	5.37	0	0.029	0	0
	马尔康	6.26	7.94	4.89	0	0.03	0	0.003
	托托河	6.67	8.26	4.87	0	0.944	0	0
	沙坪坝	6.11	7.67	4.63	0	0	0	0

表 3 WXGEN 模拟的月天气数据各误差评定指标值

气象参数	站名	绝对误差 平均值	标准误差	误差 标准差	F 检验 $p$ 值	T 检验 $p$ 值	M—W 检验 $p$ 值	K—S 检验 $p$ 值
平均气温/ °C	都江堰	0.92	1.19	0.76	0.859	0.765	0.691	0.952
	丽江	0.89	1.08	0.61	0.277	0.758	0.604	0.388
	马尔康	1.03	1.21	1.07	0.379	0.713	0.056	0.134
	托托河	1.10	1.51	1.04	0.317	0.626	0.526	0.306
	沙坪坝	0.96	1.27	0.83	0.880	0.959	0.948	0.998
最高气温/ °C	都江堰	1.34	1.71	1.06	0.92	0.409	0.332	0.306
	丽江	1.17	1.45	0.86	0.087	0.290	0.327	0.482
	马尔康	1.38	1.79	1.15	0.474	0.240	0.273	0.694
	托托河	1.49	1.89	1.17	0.124	0.373	0.310	0.099
	沙坪坝	1.42	1.83	1.16	0.98	0.572	0.521	0.694
最低气温/ °C	都江堰	0.94	1.18	0.71	0.944	0.434	0.306	0.236
	丽江	1.04	1.32	0.81	0.681	0.290	0.211	0.586
	马尔康	0.85	1.07	0.66	0.943	0.591	0.433	0.482
	托托河	1.81	2.25	1.35	0.724	0.187	0.080	0.099
	沙坪坝	0.84	1.10	0.70	0.952	0.562	0.451	0.586
降雨量/ mm	都江堰	44.62	77.22	63.29	0.551	0.880	0.699	0.388
	丽江	32.18	52.16	41.22	0	0	0.175	0.062
	马尔康	28.01	41.43	30.66	0.032	0.088	0.192	0.134
	托托河	13.55	24.53	20.53	0	0.011	0.350	0.071
	沙坪坝	45.46	80.95	67.25	0.046	0.130	0.346	0.799
太阳辐射量/ (MJ·m <sup>-2</sup> )	都江堰	1.64	2.07	1.28	0.333	0	0	0
	丽江	1.93	2.44	1.50	0	0	0.021	0
	马尔康	1.66	2.02	1.15	0.384	0.403	0.500	0.694
	托托河	1.77	2.20	1.32	0.054	0.999	0.736	0.306
	沙坪坝	1.65	2.14	1.37	0.699	0.090	0.035	0.134

### 2.3 天气数据误差的月际差异

2.3.1 降水数据的月际差异分析 对 5 个气象站 12 个月的降雨量绝对误差平均值进行计算,结果如图 1 所示。WXGEN 天气发生器产生的月降雨量数据误差具有明显的月际差异,误差最大的月份是 7 月,5 个气象站平均绝对误差为 82.29 mm,误差最小的是 1 和 12 月,5 个气象站平均绝对误差为 6.32 和 5.96 mm。从季节上来看,夏季模拟的误差最大,其次是春季和秋季,冬季模拟的误差最小。从绝对误差平均值的形态特征来看,它和长江上游地区年降水量的分布特征正相关,即降雨量越大,天气发生器模拟的降雨量绝对误差越大。对 5 个气象站 12 个月的误差平均值进行计算,结果如图 2 所示。从总体特征上看,除都江堰站 6 和 7 月的模拟值比较明显地高于实测值外,其他各站模拟的降雨量普遍低于实际降雨量。从季节特征来看,模型对降雨量较小的冬季的模拟效果较好,对降雨量较大的春季和秋季模拟的预测值普遍低于实际值,对降雨量最大的夏季模拟的结果存在较大的波动性。

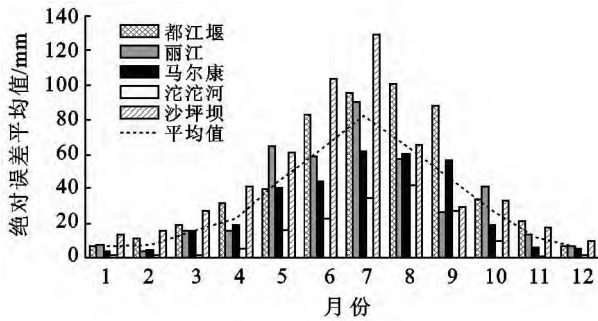


图 1 5 个气象站各月份的降水绝对误差平均值分布

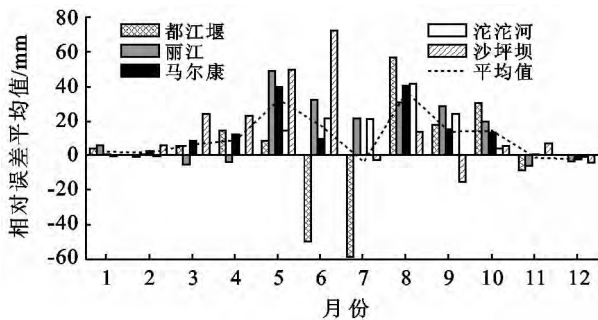


图 2 5 个气象站各月份的降水误差平均值分布

2.3.2 气温和太阳辐射数据的月际差异分析 对 5 个气象站 12 个月的平均气温、最高气温和最低气温绝对误差平均值进行计算,结果如图 3 所示。WXGEN 天气发生器产生的气温数据和太阳辐射绝对误差具有明显的月际差异。最高气温的绝对误差大于最低气温和平均气温,从绝对误差的季节分布特征来

看,春季和秋季模型模拟的气温数据误差大于夏季和冬季,太阳辐射的模拟绝对误差最大值出现在夏季,误差大小同长江上游地区的太阳辐射量的年分布成正相关。对 5 个气象站 12 个月的平均气温、最高气温和最低气温误差平均值进行计算,结果如图 4 所示。从总体特征上看,模拟的各月最高气温和最低气温均低于实际值,而太阳辐射量模拟值却高于实际值。

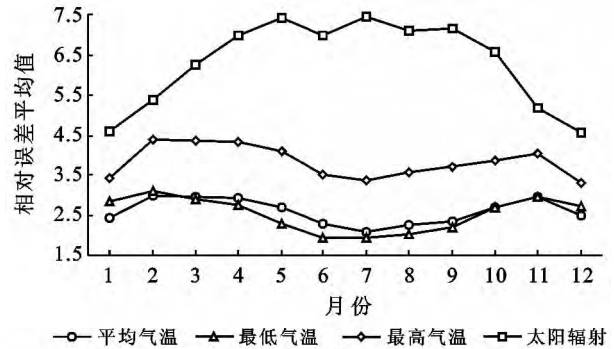


图 3 5 个气象站各月份的气温和太阳辐射绝对误差平均值分布

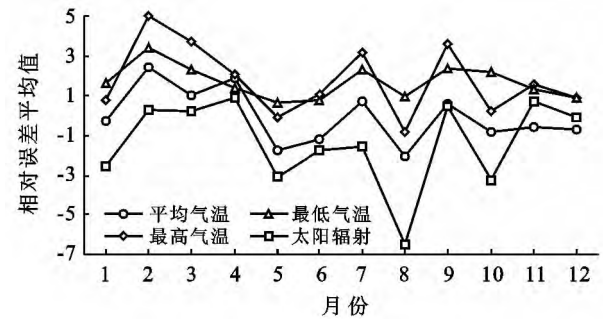


图 4 5 个气象站各月份的气温和太阳辐射误差平均值分布

## 3 结论

WXGEN 天气发生器在长江上游 5 个不同地貌区气象站模拟的日和月各气象参数的误差评价指标的值基本一致,说明该天气发生器在长江上游各地区的模拟的精度基本相当;从模拟的日观测数据和实测数据的分布情况来看,大部分模拟参数和实测参数都在 0.05 的显著水平下差异显著,说明天气发生器产生的日气象数据和实际天气数据差异较大,数据可靠性差,如将结果应用于 SWAT 模型的运算,可能会对结果造成比较大的影响;WXGEN 天气发生器模拟的各项月天气数据误差小于日天气数据模拟的误差,从分布特征来看,大部分月模拟参数和实测参数都在 0.05 的显著水平下差异不显著,模拟结果比较可靠,因此 WXGEN 天气发生器更适合于长江上游地区月气象数据的模拟。

从模拟值绝对误差的分布来看,各月气象参数模拟值的绝对误差存在比较明显的季节规律性,夏季的月降雨量绝对误差和月太阳辐射绝对误差高于春季和秋季,冬季的月降雨量绝对误差和月太阳辐射绝对误差最小,月平均气温、月最高气温和月最低气温的 3 个气温参数的绝对误差在春季和秋季高于夏季和冬季;从模拟值平均误差的分布来看,模拟的各月最高气温和最低气温均低于实际值,而太阳辐射量模拟值却高于实际值,除都江堰站 6 和 7 月的模拟降雨量比较明显地高于实测值外,其他各站模拟的降雨量普遍低于实际降雨量。造成这种规律性的误差分布的原因可能是天气发生器在长江上游地区应用时产生了系统误差,因此针对我国不同地区的气象特征对 WXGEN 天气发生器进行改进或者研发基于我国气候特征的天气发生器将是未来研究中需要解决的问题。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009 [M]. Texas Water Resources Institute Technical Report, 2011:65-87.
- [2] Wilks D S, Wilby R L. The weather generation game: A review of stochastic weather models [J]. *Progress in Physical Geography*, 1999,23(3):329-357.
- [3] Semenov M A, Brooks R J, Barrow E M, et al. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates [J]. *Climate Research*, 1998,10(2):95-107.
- [4] 何丙辉, 缪驰远, 陈晓燕, 等. CLIGEN 气候生成器模型在紫色土地地区的适应性研究 [J]. *中国水土保持科学*, 2007,21(3):183-187.
- [5] Chen Jie, Zhang Xunchang, Liu Wenzhao, et al. Assessment and improvement of CLIGEN non-precipitation parameters for the Loess Plateau of China [J]. *Transaction of the ASABE*, 2008,51(3):901-913.
- [6] 张光辉. CLIGEN 天气发生器在黄河流域的适应性研究 [J]. *水土保持学报*, 2004,18(1):175-178.
- [7] Fan Jenchen, Yang Chihhsiang, Liu Chehsin, et al. Assessment and validation of CLIGEN-simulated rainfall data for Northern Taiwan [J]. *Paddy and Water Environment*, 2013,11(4):161-173.
- [8] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment (Part 1): Model development [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998,34(1):73-89.
- [9] Williams J R, Jones C A, Kiniry J R, et al. The EPIC crop growth-model [J]. *Transactions of the ASAE*, 1989,32(2):497-511.
- [10] Richardson C W. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation [J]. *Water Resources Research*, 1981,17(1):182-190.
- [11] Hayhoe H N. Relationship between weather variables in observed and WXGEN generated data series [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998,90(3):203-214.
- [12] Trevor W R W, John F G. An assessment of the weather generator (WXGEN) used in the erosion/productivity impact calculator (EPIC) [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995,73(12):115-133.
- [13] Hayhoe H N, Stewart D W. Evaluation of CLIGEN and WXGEN Weather Data Generators Under Canadian Conditions [J]. *Canadian Water Resources Journal*, 1996,21(1):53-67.
- [14] 张东, 张万昌, 朱利, 等. SWAT 分布式流域水文物理模型的改进及应用研究 [J]. *地理科学*, 2005,25(4):434-440.
- [15] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究 [J]. *地理科学进展*, 2003,22(1):79-86.
- [16] 范丽丽, 沈珍瑶, 刘瑞民, 等. 基于 SWAT 模型的大宁河流域非点源污染空间特性研究 [J]. *水土保持通报*, 2008,28(4):133-137.
- [17] 李军, 邵明安, 张兴昌. 黄土高原地区 EPIC 模型数据库组建 [J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*, 2004,32(8):21-26.
- [18] 钟壬琳, 张平仓. 红壤和紫色土抗侵蚀性指标的计算方法研究 [J]. *水土保持通报*, 2011,31(6):95-98.
- [19] 王志强, 方伟华, 何飞, 等. 中国北方气候变化对小麦产量的影响:基于 EPIC 模型的模拟研究 [J]. *自然灾害学报*, 2008,17(1):109-114.