

CLIGEN 降水要素在黄土塬区的适应性评估

李志^{1,2,3}, 刘文兆^{1,2†}, 张勋昌⁴, 李双江^{1,3}, 陈杰²

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所; 2. 西北农林科技大学资源环境学院; 712100, 陕西杨凌;
3. 中国科学院研究生院, 100049, 北京; 4. USDA-ARS Grazinglands Research Laboratory, 73036, El Reno, Oklahoma, USA)

摘要 CLIGEN 是目前较全面产生降水要素(降水量、历时、达到最大降水强度的时间与降水总历时的比率、最大降水强度与平均降水强度的比率)的天气发生器,其生成降水要素的质量直接影响水文和农业响应模型的输出结果。利用黄土高原长武 1957—2001 年的日气象观测数据、王东沟流域 1988—2001 年的降水要素数据和 CLIGEN 生成的 100 年日气象数据,对 CLIGEN 模型产生日、月、年降水量的均值和方差、概率分布、降水极端值和降水历时、强度进行评估。结果表明:CLIGEN 对日、月和年降水量均值的模拟效果较好,相对误差都不大于 1.0%;对标准差的模拟结果偏低,相对误差的绝对值小于 6.6%;没有模拟出日降水量的概率分布,但是较好地模拟出了月和年降水量的概率分布;对日、月和年最大降水量的模拟误差较大,表明 CLIGEN 对极值的模拟精度有待提高。CLIGEN 很好地模拟出连续降水的频率,但是连续干旱天数在 20 d 以内的累积频率的平均相对误差为 8.9%;CLIGEN 产生的最大降水强度与平均降水强度的比率高于实测数据;相对于实测数据,CLIGEN 模拟的降水历时和降水量具有相同的趋势,对小降水量或短历时的模拟结果偏高,对大降水量或长历时的模拟结果偏低。

关键词 天气发生器; CLIGEN; 降水要素; 模型评估; 黄土塬区

Evaluation of CLIGEN precipitation elements on Loess Plateau

Li Zhi^{1,2,3}, Liu Wenzhao^{1,2}, Zhang Xunchang⁴, Li Shuangjiang^{1,3}, Chen Jie²

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,
2. College of Resources and Environmental Science, Northwest Sci Tech University of Agriculture and Forestry:
712100, Yangling, Shaanxi; 3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 100049, Beijing; China;
4. USDA-ARS Grazinglands Research Laboratory, 73036, El Reno, Oklahoma, USA)

Abstract Among the commonly used stochastic weather generator, CLIGEN is the only one that generates precipitation elements (i. e. precipitation amount, storm duration, time to peak, peak intensity), which will affect the output of hydrological and agricultural response models. Using daily weather data of Changwu weather station from 1957 to 2001, precipitation element data of Wandonggou watershed from 1988 to 2001 and 100 years of CLIGEN generated data, were the ability of the CLIGEN model to reproduce daily, monthly, and annual precipitation amounts, probability distribution, extremes, and internal storm patterns (i. e., storm duration and relative peak intensity) were evaluated. Means of daily, monthly, and annual precipitation were adequately preserved by CLIGEN and were evaluated absolute relative errors were not more than 1.0%; Standard deviation were all unpredicted and the absolute relative errors were less than 6.6%. Two other probability

收稿日期: 2005-11-29 修回日期: 2006-09-11

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); 国家自然科学基金重大研究计划项目“黄土区流域尺度水文生态过程及其对全球气候变化的响应”(90202011); 中国科学院知识创新工程重要方向项目“黄土高原水土保持的区域环境效应研究”(KZCX3-SW-421)

第一作者简介: 李志(1978—), 男, 博士生。主要研究方向: 流域水文生态及气候变化影响评估。E-mail: lizhibox@126.com

† 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

distributions except daily precipitation were well simulated. Mean absolute relative errors for the all time maxima of daily, monthly, and yearly precipitation were relatively bigger than corresponding precipitation, suggesting that the ability of predicting extreme need to be improved. The frequencies of wet periods were relatively well replicated by the model, while the frequencies of dry periods less than 20 days have an average relative error of 8.9%. Relative peak intensity generated (ip) by CLIGEN was relatively overestimated than the measured. The CLIGEN-generated durations and precipitation have the similar trend, which were overpredicted for small storms or short duration and underpredicted for large storms or long duration compared with the measured.

Key words weather generator; CLIGEN; precipitation elements; model evaluation; Loess Plateau

目前,许多基于物理机制的水文和自然资源管理模型都需要日天气序列数据来驱动。基于这种需求,各种随机天气发生器被开发出来,如 CLIGEN (Nicks, 1995)、USCLIMATE (Hanson, 1994)、WGEN (Richardson and Wright, 1984) 和 CLIMGEN (Gaylon S. Campbell, 1990)。当某地没有观测记录、观测资料过短或者有大量数据缺失时,天气发生器可以通过参数的插值,对该地区的逐日天气条件进行模拟,从而弥补气候资料的不足。更重要的是,这些发生器可以通过率定参数来产生未来气候资料,这对于评价水文过程和自然资源对气候变化的响应非常重要^[1-2]。

对不同版本的 CLIGEN 和 USCLIMATE,许多学者已经进行了几项评估和有效性验证。Johnson 等^[3]在 1996 年使用散布在美国 6 个地点的天气资料,对 2 个模型进行了详尽的评估。结果表明:2 个模型能很好地保留年和月降水的统计特征值(包括均值、标准差和极端值),但是对逐日降水量,特别是降水极端值的模拟效果不好;2 个模型使用的一阶马尔可夫链,可以较好地产生降水和干燥天气发生的顺序。Wallis 和 Griffiths^[4]利用德克萨斯州 5 个地点的天气数据,评估了 WXGEN 模型,该模型是 CLIGEN 和 USCLIMATE 结合而成的,它与 CLIGEN 产生日降水的运算法则相同,结果发现,WXGEN 模型产生的日和月降水不如 1996 年 Johnson 等进行的评估那样令人满意。1997 年,Headrick 和 Wilson^[5]使用明尼苏达州 5 个地方的资料,对 CLIGEN 产生的模型参数进行评估,发现 CLIGEN 很合理地生成了日降水量,但是产生的降水历时不能让人满意。张光辉^[6]利用黄河流域 3 个气象站点 30 年降水和气温的月平均资料,对 CLIGEN 发生器在黄河流域的适应性进行了检验,结果表明模拟值的标准差普遍低于实际值。

在被广泛应用的随机天气发生器中,CLIGEN 是目前较全面产生降水要素(降水量、降水历时、最大

降水强度与平均降水强度比率、达到最大降水强度的时间与降水总历时的比率)的模型,而降水要素是许多基于物理机制的水文和自然资源管理模型所需要的,并且对模型模拟的径流和侵蚀等的影响较大^[7-9];但是,目前很少有对 CLIGEN 产生的降水要素进行系统的评估^[10-11],因此,利用黄土高原长武县 1957—2001 年的日气象资料和王东沟流域 1988—2001 年的降水要素数据,对 CLIGEN (v5.111) 产生降水要素(降水量、降水历时、最大降水强度与平均降水强度比率)的能力进行评估,为将来的研究和应用提供参考。

1 研究区概况

王东沟流域位于陕西省长武县洪家乡王东沟村 (E107°40′30″~107°42′30″,N35°12′16″~35°16′00″),海拔 946~1226 m,面积 6.3 km²,属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均温 9.2℃,年太阳总辐射量 483 kJ/cm²;年平均降水量 582.3 mm,其中 52.8% 分布在 7—9 月。该区是黄土高原沟壑区的典型代表,土壤属黑垆土,母质是中壤质马兰黄土,全剖面土质均匀疏松,通透性好,由于降雨集中且多暴雨,很容易发生土壤侵蚀。

2 研究方法

2.1 数据来源

用实测的逐日天气数据计算各气象要素的统计参数(均值、标准差、偏度和峰度等)建立 CLIGEN 的输入文件,需要的数据包括降水量,最高、最低和露点温度,太阳辐射,16 个风向的风速等基本气象数据。CLIGEN 要产生降水要素数据还需要降水历时、最大降水强度与平均降水强度的比率、最大降水强度出现的时间与总历时的比率、最大 30 min 和 6 h 降水强度等数据。所采用的基本气象数据来自长武县气象局 1957—2001 年的实测记录,降水要素数据是王东沟流域 1988—2001 年的实测资料。

2.2 模型输入与输出

使用上述数据运行相关程序即可建立 CLIGEN 的输入文件 par。par 文件包含如下参数, 每个参数均包含 12 个月的数据, 是按月计算的均值: 降水日的日均降水量及其标准差和偏度, 降水转移概率 $P(w/w)$ 和 $P(w/d)$, 日均最高、最低温度值及其标准差, 日均露点温度, 降水日的日均最大 30 min 降水强度, 日均太阳辐射及其标准差, 最大降水强度出现的时间与总历时比率, 16 个方向上的风速均值、标准差和偏度系数, 出现该风向的风占有风日的比率等。

使用实测逐日天气数据建立 par 文件后, 就可以将其作为 CLIGEN 的输入文件输出 cli 文件, 该文件包括 10 个逐日天气数据: 降水量、降水历时、最大降水强度与平均降水强度比率、达到最大降水强度的时间与降水总历时的比率、最高温度、最低温度、太阳辐射、风向、风速和露点温度。

2.3 参数选择

建立 par 文件后, 使用 CLIGEN v5.111 默认的随机种子, 并且不使用内插来产生 100 年的日天气数据 cli 文件。然后, 对实测和产生的降水要素进行统计分析, 通过比较其统计参数的方法来检验 CLIGEN 产生降水要素的能力。

在参数的选择方面, 比较降水量时使用的统计参数包括日 ($p > 1 \text{ mm}$)、月和年降水的均值、方差、偏度、峰度和极端值; 同时, 为了评估模型产生的数据与实测数据的偏差, 计算了相对误差; 另外, 还进

行了 2 项非参数检验——KS 检验、秩和检验, 这 2 项检验适用于任何分布, 可以用来检验 2 组数据是否具有相似分布。

降水要素除了降水量, 还包括降水历时和降水强度, 使用王东沟流域实测的降水历时和计算出的最大降水强度与平均降水强度比率, 对 CLIGEN 产生的相应数据进行了评价。实测和产生的降水量、降水历时和最大降水强度与平均降水强度比率的百分位数被计算出来, 并进行作图比较, 在此基础上, 进一步评价了降水量不同 ($> 1 \text{ mm}$ 和 $< 10 \text{ mm}$ 的降水) 的降水要素。除此以外, 还对 CLIGEN 模拟连续降水和干旱频率的能力进行评估。

3 结果与讨论

3.1 日降水量

表 1 列出了王东沟流域日降水量的统计参数。结果表明, CLIGEN 产生的日降水的平均值偏高而标准差偏低, 但是差距并不大, 两者的相对误差分别为 1.0% 和 -4.8%。实测降水的偏态分布属严重左偏, CLIGEN 较好地保留了该趋势, 相对误差只有 2.4%。实测降水的分布有很大的尖峰, CLIGEN 也模拟出了这种趋势。实测和产生的日降水的累积分布非常接近, 这可以从百分位数看出来; 然而, CLIGEN 对王东沟流域日降水的模拟, 对小降水量 ($< 92\%$ 的百分位数) 的模拟结果一直处于偏高的状态,

表 1 实测和生成的日降水量和年最大日降水量的统计参数

Tab. 1 Statistics of daily and annual maximum daily precipitation amounts

参数	日降水量			年最大日降水量		
	实测值	生成值	相对误差 / %	实测值	生成值	相对误差 / %
均值 / mm	8.5	8.6	1.0	49.3	46.9	-5.2
标准差 / mm	9.8	9.4	-4.8	16.8	16.85	0.5
偏度	2.8	2.9	2.4	1.0	1.7	41.1
峰度	11.8	14.2	16.9	1.4	4.3	67.5
百分位数 / mm						
25	2.3	2.6	11.5	38.3	36.2	-5.8
50	5.0	5.3	5.7	46.5	41.9	-11.1
75	10.8	11.1	2.7	58.6	54.1	-8.3
95	27.8	26.9	-3.3	81.2	78.3	-3.7
最大日降水量 / mm	102.2	124.3	17.8	—	—	—
年均降水时间 / d	64.91	64.89	-0.03	—	—	—
KS 检验 P	0.002			0.333		
秩和检验 P	0.008			0.292		

而对大降水量的模拟结果偏低。对于所有研究年份内的最大日降水量, CLIGEN 的模拟结果偏高, 相对误差达到了 17.8%, 这与分布的峰度具有一致的趋势。对于降水量大于 1 mm 的年均降水时间, CLIGEN 的模拟结果较好, 相对误差只有 -0.03%。KS 检验和 Wilcoxon 秩和检验的结果都在 $P = 0.01$ 的显著性水平上, 否定了实测数据和产生的数据具有相同分布的假定。

3.2 年最大日降水量

王东沟流域年最大日降水(表 1) 均值和方差的相对误差分别为 -5.2% 和 0.5%; 总体而言, 模拟的年最大日降水比实测的数据要偏低, 这也可以从累积分布的百分位数上看出来。实测和产生的年最大

日降水量通过了 $P = 0.01$ 的 KS 检验和秩和检验, 表明它们具有相似的分布, 说明总体上 CLIGEN 模拟出来了实测数据的趋势, CLIGEN 对年最大降水量的模拟效果比日降水量要好。

3.3 月降水量

CLIGEN 很好地模拟出了月降水量(表 2) 的均值, 只有 0.5% 的相对误差; 标准差的模拟效果不好, 相对误差达到 -6.6%。月降水量的偏度和峰度要比日降水量小得多, 但是模拟结果不太理想, 相对于实测数据而言, 模拟的分布要左偏, 并且更加扁平一些。月降水量实测和模拟数据通过了 $P = 0.01$ 的 KS 检验和秩和检验, 表明两者具有相似的分布。

表 2 实测和生成的月、年降水量的统计参数

Tab. 2 Statistics of monthly and annual precipitation amounts

参数	月降水量			年降水量		
	实测值	生成值	相对误差/%	实测值	生成值	相对误差/%
均值/mm	48.0	48.3	0.5	576.3	579.1	0.5
标准差/mm	50.2	47.1	-6.6	127.6	121.2	-5.3
偏度	1.7	1.4	-16.9	0.2	0.9	81.3
峰度	3.4	2.4	-40.6	-0.6	1.3	145.4
百分位数/mm						
25	10.5	10.3	-1.7	479.0	494.6	3.2
50	32.5	35.4	8.2	557.9	569.0	2.0
75	70.3	70.4	0.2	673.1	642.7	-4.7
95	147.4	141.2	-4.4	808.1	794.7	-1.7
最大降水量/mm	305.9	275.2	-11.2	822.2	987.0	16.7
KS 检验 P	0.650			0.933		
秩和检验 P	0.453			0.986		

3.4 年降水量

年降水量(表 2) 均值和标准差的模拟与月降水非常相似, 均值稍高而标准差偏低, 相对误差分别为 0.5% 和 -5.3%。分布的偏度和峰度相对较小, 表明年降水的分布接近于正态分布。累积分布表明大概有 50% 的产生数据(干旱年) 稍高于实测数据, 有 50% 的模拟数据(丰水年) 稍低于实测数据。最大年降水量的偏差较大, 模拟数据高于实测数据 16.7%。KS 检验和秩和检验都通过了 $P = 0.01$ 的显著性水平, 表明两者具有相似的分布。

3.5 连续降水和干旱的频率

图 1 是实测和产生的连续降水和干旱频率的累积分布图, 横坐标表示连续干旱或者降水的时间, 纵

坐标表示累积频率。可以看出, CLIGEN 很好地模拟出了连续降水的频率; 但是对连续干旱频率的模拟精度有待提高, 连续干旱时间在 20 d 以内的累积频率的平均相对误差为 8.9%。另外需要注意的是, CLIGEN 产生的连续干旱或者降水时间的最长时段要比实测的时间短, 如实测连续降水和干旱的最长时间分别为 19 和 83 d, 而 CLIGEN 产生的分别为 14 和 69 d。

3.6 降水历时和最大降水强度与平均降水强度的比率

图 2 是降水量(p)、降水历时(D)、最大降水强度与平均降水强度比率(i_p) 的累积分布图(数据点为 5th, 10th, 15th, 20th, ..., 80th, 85th, 90th, 95th, 99th 的百

分位数)。相对于实测的降水量, CLIGEN 对小降水量的模拟结果偏高, 对大降水量的模拟结果偏低; CLIGEN 对降雨历时的模拟存在着同降水量相同的趋势, 对短历时降水的模拟结果偏高, 对长历时降水

的模拟结果偏低; 对最大降水强度与平均降水强度比率的模拟, CLIGEN 的生成值均小于等于根据实测数据计算的数值。

CLIGEN 对降水要素的模拟与降水大小有一定

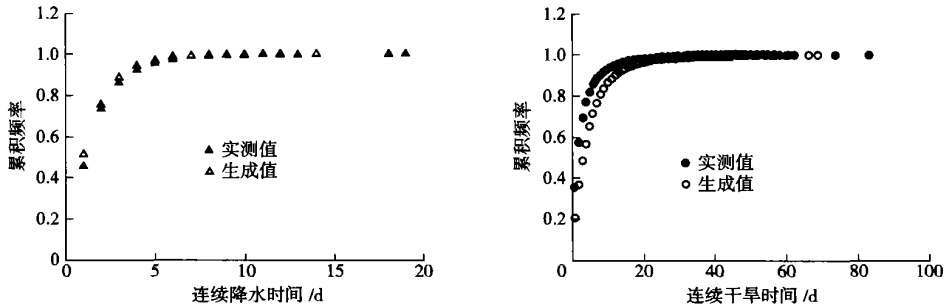


图 1 实测和生成的连续降水与干旱频率的累积分布

Fig. 1 Cumulative distribution of precipitation and dry periods frequency

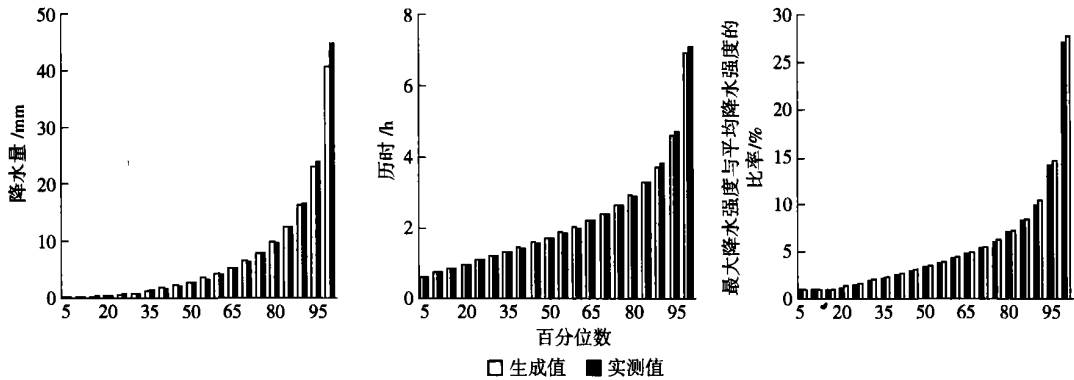


图 2 实测和生成的降水量、历时和最大降水强度与平均降水强度比率的累积分布图

Fig. 2 Cumulative distribution of precipitation amounts, duration, maximum precipitation and precipitation intensity ratio

的关系, 表 3 是对 > 1 mm 和 > 10 mm 降水的降水历时和最大降水强度与平均降水强度比率的统计参数。对于 > 1 mm 和 > 10 mm 的降水, 实测和产生降水历时和最大降水强度与平均降水强度比率的均值和方差相差都很大。实测和产生降水历时之间的差距, > 10mm 的降水要比 > 1 mm 的降水高得多, 标准差也具有同样的特点。> 1 mm 的降水, 实测数据的偏度和峰度要小于产生的数据; 而 > 10 mm 降水的偏度和峰度相对变小, 表明对于较大降水, CLIGEN 对降水历时和最大降水强度与平均降水强度比率进行了相对的缓和。P = 0.01 的 KS 检验和秩和检验否定了实测的与模拟的降水历时和最大降水强度与平均降水强度比率具有相同分布的假定。

表 3 > 1 mm 和 > 10 mm 降水的历时和最大降水强度与平均降水强度比率的统计参数

Tab. 3 Statistics of storm duration and relative peak intensity for storms > 1 mm and > 10 mm

参数	> 1 mm 降水				> 10 mm 降水			
	实测值		生成值		实测值		生成值	
	D	i_p	D	i_p	D	i_p	D	i_p
均值	6.40	1.65	2.07	5.18	9.65	1.69	2.13	5.41
标准差	5.92	2.45	1.42	5.48	6.66	1.08	1.36	5.19
偏度	1.67	4.43	1.96	3.97	1.08	1.36	1.12	3.39
峰度	3.66	29.02	6.77	30.35	2.52	3.58	1.14	19.06

上, 实测降水的降水量, 历时和最大降水强度与平均降水强度比率之间都具有一定的相关关系, 这说明 CLIGEN 在模拟降水要素变量间的相关关系方面还有待改进。文献[12]详细阐述了这一点, 并提出了修正的方法, 通过引进降水和降水历时的相关关系,

可以取得较好的效果^[11-12]。

4 结论

对降水量的模拟, CLIGEN 很好地模拟出了日、月和年降水量的均值, 相对误差都不大于 1.0%; 对方差的模拟系统偏低, 但是相对误差的绝对值都小于 6.6%, 由于方差与降水的极值有关系, 表明 CLIGEN 对降水极值的模拟精度不高。非参数检验的结果表明, CLIGEN 不能模拟出日降水量的概率分布, 但是月和年降水量的概率分布都可以被较好地保留下来。CLIGEN 产生的日、月和年降水量最大值的相对误差都要较日、月、年平均降水量的误差大, 这与 CLIGEN 对日、月、年降水量偏度和峰度模拟误差较大保持一致的关系, 这也说明 CLIGEN 对极值的模拟精度有待进一步提高。

CLIGEN 很好地模拟出了连续降水的频率, 但是对连续干旱频率的模拟精度需要提高, 连续干旱天数在 20 d 以内的累积频率的平均相对误差为 8.9%。对于最大降水强度与平均降水强度的比率, CLIGEN 产生的数值大多高于实测值; CLIGEN 对降水历时的模拟与降水量有相同的趋势, 对短历时或小降水量模拟结果偏高, 对长历时或大降水量模拟结果偏低, 并对 > 10 mm 降水的历时和最大降水强度与平均降水强度比率进行了相对的缓和。

由于研究需要和数据的可得性, 仅对 CLIGEN 在长武王东沟流域的适用性进行了分析, 总体而言, CLIGEN 在模拟降水量方面精度较高, 但是在产生各降水要素时不同程度地存在误差。根据张勋昌等利用 12 个站点气象资料进行评估的结果, 这些误差是普遍存在的; 因此, 虽然仅量化了长武使用 CLIGEN 的误差, 但也可以为其它区域提供参考。然而, 由于 CLIGEN 在具体区域的适用性不同, 在量化误差、校准模型时还是要对其进行详细的评估。

5 参考文献

- [1] Wilks D S. Adapting stochastic weather generation algorithms for climate change studies. *Climatic Change*, 1992, 22: 67-84
- [2] Katz R W. Use of conditional stochastic models to generate climate change scenarios. *Climatic Change*, 1996, 32: 237-255
- [3] Johnson G L, Hanson C L, Hardegree S P, et al. Stochastic weather simulation: Overview and analysis of two commonly used models. *J Applied Meteorology*, 1996, 35(10): 1878-1896
- [4] Wallis T R, Griffiths J F. An assessment of the weather generator (WXGEN) used in the erosion/productivity impact calculator (EPIC). *Agric and Forest Meteorology*, 1995, 73(1-2): 115-133
- [5] Headrick M G, Wilson B N. An evaluation of stochastic weather parameters for minnesota and their impact on WEPP. *ASAE*, 1997, 2: 14
- [6] 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, 196
- [7] 王浩, 杨爱民, 周祖昊, 等. 基于分布式水文模型的水土保持水文水资源效应研究. *中国水土保持科学*, 2005, 3(4): 6-10
- [8] 王云琦, 王玉杰, 朱金兆, 等. 重庆缙云山不同土地利用类型坡面产流对暴雨的响应. *中国水土保持科学*, 2005, 3(4): 19-26
- [9] 吴钦孝, 李秧秧. 黄龙山区不同类型小流域的产流过程及其特征. *中国水土保持科学*, 2005, 3(3): 10-15
- [10] Yu B. Improvement and evaluation of CLIGEN for stom generation. *Transactions of the ASAE*, 2000, 43(2): 301
- [11] Zhang X C, Garbrecht J D. Evaluation of CLIGEN precipitation parameters and their implication on WEPP runoff and erosion prediction. *ASAE*, 2003, 46(2): 311
- [12] Zhang X C. Generating correlative stom variables for CLIGEN using a distribution free approach. *ASAE*, 2005, 48(2): 567