

# 潮白河流域降水演变及其径流效应

陈似蓝<sup>1</sup>, 刘家宏<sup>1,2</sup>, 王浩<sup>1,2</sup>, 杨汉波<sup>3</sup>, 邵薇薇<sup>1</sup>, 高学睿<sup>1</sup>

(1.中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038;

2.水利部水资源与水生态工程技术研究中心,北京 100044;

3.清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室,北京 100084)

**摘要:**分析了潮白河流域 1991~2000 年降水资料时空演变规律,采用同倍比放大法对各年的降水数据进行整体轮换处理,处理后各年总降水量为 1991~2000 年的平均年降水量。随后基于 GBHM(Geomorphology-Based Hydrological Model)模型进行了 10 年径流量模拟。结果显示,在降水总量相同的情况下,1994 年型降水时空分布最有利于产流,径流总量与峰值流量最大,1999 年型径流总量与峰值流量最小。1994 年型径流总量是 1999 年型径流总量的 3.88 倍;1994 年型峰值流量是 1999 年型峰值流量的 35.87 倍。由此可见,降水总量相同时,其时空分布对径流总量和峰值的影响极大。

**关键词:**降水演变;径流;分布式水文模型;潮白河流域

中图分类号:P333.1

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2015)03-0038-05

## 1 引言

全球气候变化和周期性的水文节律会带来区域降水的时空演变,进而影响地表径流和水资源的时空分布。目前关于降水演变及水资源效应的研究是气候变化研究热点,Karl 等人<sup>[1]</sup>的研究认为全球气温升高导致大气中的水分含量增加,有利于强降雨或降雪的事件。Muller 等人<sup>[2]</sup>认为温度、温室气体、气溶胶、太阳辐射和云反射的变化都会影响全球的降水平均速率。Rahmani 等人<sup>[3]</sup>通过对 Kansas 地区的降雨序列的分析研究,认为极端降雨在未来几年将会有所增加,降雨分布在时空上将会发生变化。Mendizabal 等人<sup>[4]</sup>基于西班牙 Deba 河的模型模拟,研究了气候变化,尤其是极端降水的增加对洪水的影响及其对人类的后果。严华生等人<sup>[5]</sup>采用正交小波分析方法得出近百年中国降水的变化趋势在不同时间尺度上有不同的变化,且各地之间的显著尺度也不同。牛存稳等人<sup>[6]</sup>将华北地区划分为 6 个代表区域,利用小波分析方法研究了华北地区降水分布的特征和年代际变化。张磊等人<sup>[7]</sup>运用距平均法

及变差系数法分析了潮白河降水量的变化特征。叶佰生等人<sup>[8]</sup>应用水量平衡模型估计了各种气候情况,得到了伊犁河上游流域气候变化对径流产生的几方面影响。王云璋等人<sup>[9]</sup>通过黄河上游兰州以上地区近 50 年降水量资料的统计分析并结合兰州站天然年径流量,建立了天然年径流量计算公式,计算分析了降水变化对径流量的影响。本次研究基于 GBHM (Geomorphology-Based Hydrological Model) 分布式水文模型<sup>[10-13]</sup>,采用潮白河流域 1991~2000 年的降水数据,定量分析了该区域的降水演变及其径流效应。

## 2 研究方法

本文重点探究降水演变的径流效应,所以仅对降水数据进行变换,其他流域下垫面数据保持不变。具体地,采用年降雨总量不变,降雨量在时间上,即日尺度上进行变换。变换方法采用整体轮换模式下的同倍比放大法,变换后各年的降雨总量为一固定值,降雨时空分布仍保留当年的特征。考虑到本区域的气候和降水特征要与下垫面条件相适应性,该固定值选取研

收稿日期:2014-05-28

基金项目:国家自然科学基金(51279208,51109222)

作者简介:陈似蓝(1990-),女,福建漳平人,硕士研究生,研究方向为城市水循环。E-mail:silan0318@163.com

通讯作者:刘家宏(1977-),男,湖北钟祥人,教授级高级工程师,研究方向为水文学及水资源。E-mail:liujh@iwhr.com

究系列的年平均降雨总量。研究区域内各雨量站的日降雨量通过乘以各年的年降雨量与系列平均降雨量的比例系数进行调整。比例系数计算见式(1)。

$$\alpha_i = \frac{\bar{P}}{P_i} \quad (1)$$

式中: $\alpha_i$ 为比例系数; $\bar{P}$ 为10a平均年降雨总量; $P_i$ 为各年降雨总量; $i$ 为年份编号。那么,将各年日降雨量乘以 $\alpha_i$ 即得到变换后的日降雨量。为了实现这种变换形式,本研究编写了一个雨量变换程序,能够对研究区域内的所有雨量站的降雨量数据进行逐一变换,得到保留当年降雨分布特征的同倍比放大(或缩小)的降雨量。

降水-径流模拟采用GBHM模型实现,模拟径流计算基本流程如图1:

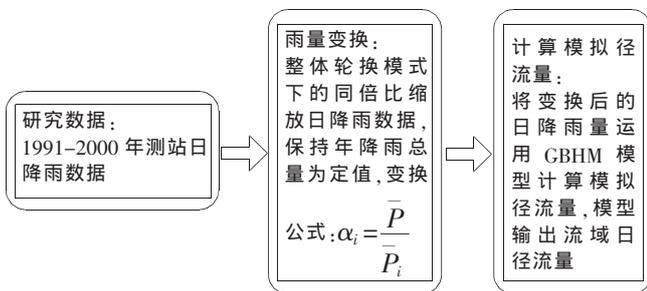


图1 基本流程图  
Fig. 1 The basic flow

### 3 研究区域概况与数据

#### 3.1 潮白河流域概况

本文选取潮白河流域为研究地区。潮白河是中国海河水系五大河之一。贯穿北京市、天津市和河北省三省市。潮白河上游是由两条支流组成;潮河由南流经古北口后入密云水库;白河由东南流入密云水库。两河在出库后汇流成潮白河。潮白河及其支流组成潮白河水系,流域面积 $1.58 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,地理位置 $115^\circ 25' \sim 117^\circ 35' \text{ E}$ ,  $40^\circ 20' \sim 41^\circ 37' \text{ N}$ ,年天然径流量约为 $10.22 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[7]</sup>。密云水库位于北京密云县中部,主要拦蓄潮河、白河两条河流之水而成,潮白河流域及测站位置见图2。水库总库容 $43.75 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,最大水面面积 $188 \text{ km}^2$ ,占全县土地面积近10%。该地区为大陆性季风气候,年平均气温约为 $6^\circ \text{ C} \sim 10^\circ \text{ C}$ ,年平均降水量约为 $500 \sim 700 \text{ mm}$ ,降水年内分配不均,夏季7、8月份降水占全年降水量的70%以上,并且多为暴雨形式<sup>[14]</sup>。

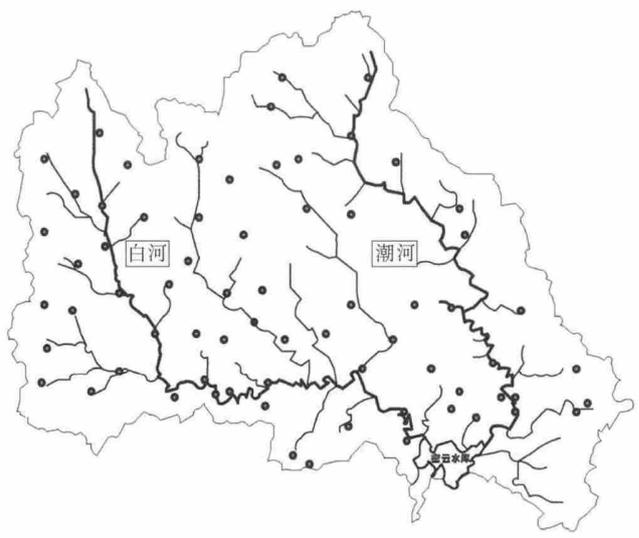


图2 潮白河流域及测站图  
Fig.2 The Chaobaihe river basin and hydrometry stations

#### 3.2 数据来源

本研究首先选取潮白河流域的72个雨量站数据和9个气象站数据,以1991~2000年的日降雨量数据为样本进行降雨变换处理,再通过GBHM分布式水文模型计算模拟径流。

研究所采用的雨量数据均来自北京潮白河流域,分别有72个雨量站实测日雨量数据和9个气象站实测日雨量数据及其他气象数据。雨量站数据包括雨量站编号、年份、月份、日期、日雨量(mm/d)。气象站数据来自国家气象局,数据包括气象站编号、年份、月份、日期、日雨量(mm/d)、平均气温( $^\circ \text{ C}$ )、最高气温( $^\circ \text{ C}$ )、最低气温( $^\circ \text{ C}$ )、风速(m/s)、相对湿度、日照时数(h)。测站的测量年份跨度有所不同,研究需要的是1991~2000年的日雨量。对于降雨的变换处理,就是处理这72个雨量站和9个气象站测得的日雨量。根据1991~2000的雨量数据,运用模型计算1991~2000的模拟径流量。

另外现有实测潮白河流域平均降雨量数据和流域平均径流量数据。实测降雨数据是1991~2000年的每月平均降雨量;实测径流数据是1991~2000年的每月平均径流量。

### 4 潮白河流域降雨径流关系分析

#### 4.1 模型检验

为了验证模型的可行性,先将未处理的实测降雨量用模型计算模拟径流。由于没有日径流量的实测数据,所以用流域平均年径流量和流域平均月径流量来对比。模型输出的模拟年径流量与实测年径流量对比

结果如图 3。

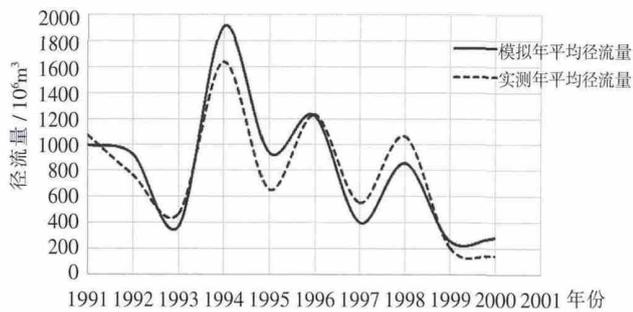


图 3 模拟年径流量与实测年径流量对比图

Fig.3 Comparison between the simulated annual runoff and observed annual runoff

为对比模拟与实测月平均径流情况,用流域平均值计算程序计算了流域月平均径流量。得到的流域平均结果与实测对比,如图 4 所示。

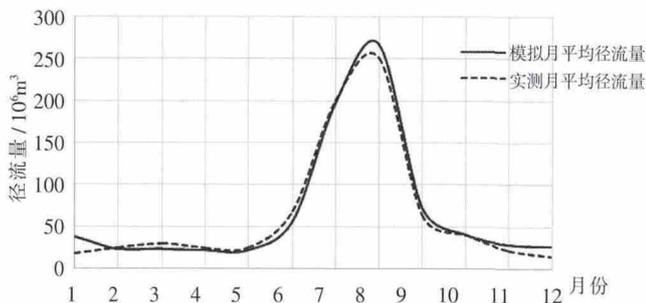


图 4 模拟流域月平均径流量与实测流域月径流量对比图

Fig.4 Comparison between the simulated mean monthly runoff and observed mean monthly runoff

由以上处理结果,可以看到,模型模拟的径流量与实测径流量在年平均上虽有细小偏差,但总体匹配状况较好;月平均径流量匹配非常好,模型的计算准确性是比较高的,故能采用此分布式水文模型进行研究。

#### 4.2 降雨径流分布分析

如表 1 所示,每年的日降雨量乘以转换系数,转换系数为 1991~2000 年十年平均年降雨总量与各年年降雨总量的比值。这样处理之后得到了年降雨总量一定,但是年内降雨过程不一样的 10 种样本。

将变换后的降雨数据放入 GBHM 模型计算模拟径流。模型计算得到的各年径流情况如图 5 所示。径流统计数据见表 2。

各年的年降雨总量已通过程序调整为定值,均为 490.7mm,虽然年降雨总量无变化,但各年的月降雨量仅仅是做了等比例的缩放处理,保留各年原本的降雨

表 1 各年日降雨量转换系数

Table 1 The conversion factors for each of the daily rainfall

年份	实际降雨量 / mm	转换后降雨量 / mm	转换系数
1991	516.4	490.7	0.950
1992	487.4	490.7	1.007
1993	410.2	490.7	1.196
1994	590.4	490.7	0.831
1995	571.0	490.7	0.859
1996	582.8	490.7	0.842
1997	389.0	490.7	1.261
1998	602.5	490.7	0.814
1999	368.2	490.7	1.333
2000	389.2	490.7	1.261

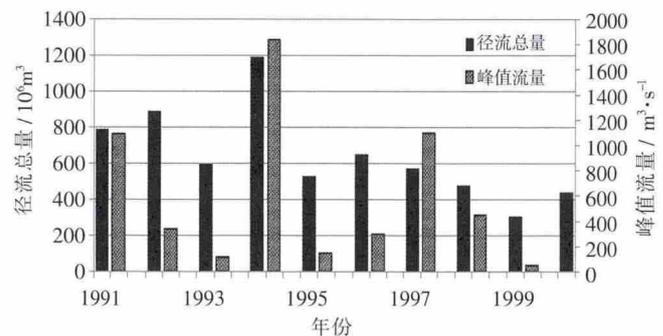


图 5 降雨总量一定各年模拟径流情况对比

Fig.5 The annual simulated runoff comparison at the same total rainfall

表 2 降雨总量一定年分布不同的各年径流统计数据

Table 2 The statistics of the various simulated yearly runoff at the same total rainfall

	均值	方差	最大值	最小值
径流总量/ $10^6\text{m}^3$	643.4	58 265	1 189.8	306.4
峰值流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	558.7	315 130	1 844.1	51.4

分布,因此 1991~2000 年的降雨在月尺度上的分布是不一样的,即季节分布不同。

图 5 为 GBHM 模型计算出的各年径流量和峰值流量,从图中可以看出,各年计算得到的径流总量和峰值流量均有明显的差别。说明降雨季节分布对径流量会产生影响,且影响显著。

从表 2 可以得到,径流总量波动较大,最大值与最小值相差很大,径流总量最大值是最小值的 3.88 倍。峰值流量波动更大,峰值流量最大值是最小值的 35.87 倍。

从计算结果中可以得到 1994 年径流总量与峰值流量最大,1999 年径流总量与峰值流量最小。为探究

其降雨分布对径流产生的影响,取这两年的降雨量的月分布进行对比,如图6所示。

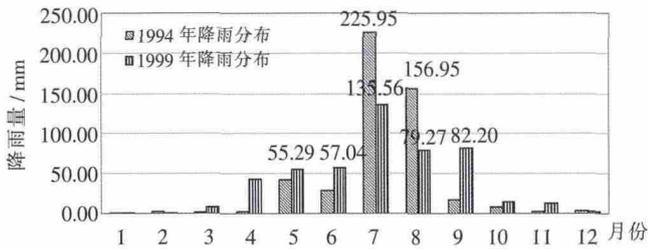


图6 1994年与1999年降雨分布对比

Fig.6 Comparison of the rainfall distribution between 1994 and 1999

通过图6可得,1994年降雨年内分布差异大,集中在夏季,在7月出现全年降雨峰值,降雨量为225.95mm,占全年降雨量的46.0%,其次是8月,7月和8月降雨量占全年降雨量的78.0%。1994年的7、8两个月降雨量明显大于1999年7、8月的降雨量。而1999年降雨季节分布差异较小,虽然就本年来说也是夏季降雨量大,但其降雨并未突出集中在7、8月,其中7月降雨量最大。7月和8月两个月降雨量仅占全年降雨量的43.8%,1999年降雨量相对平均分布在5~9月。

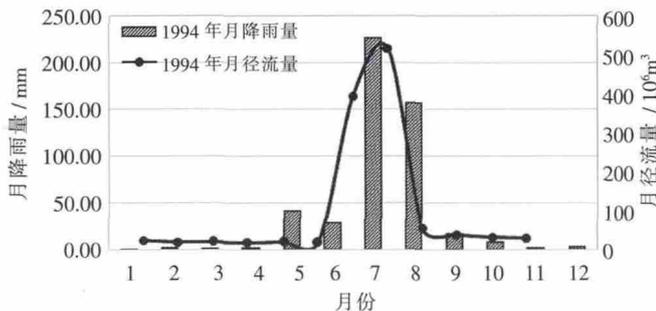


图7 1994年月降雨和径流分布图

Fig.7 The distribution of the monthly rainfall and runoff in 1994

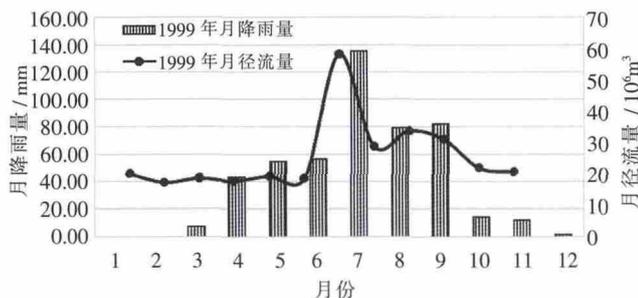


图8 1999年月降雨和径流分布图

Fig.8 The monthly rainfall and runoff distribution in 1999

降水的年内分配不均导致径流在年内分配也不均匀。对于潮白河流域,汛期降雨量是径流量的主要来

源。如图7所示,1994年的径流量最大值出现在8月份,占年径流量的43.4%,其次是7月,7、8月径流量约占年径流量的76.4%,年内分配非常集中。对于1999年型降雨来说,降雨量最大的月份径流量并不是最大,径流量最大的月份是之后一个月。如图8所示,1999年的径流量最大值出现在7月份,占年径流量的19.0%,其次是9月、10月和8月,7~10月径流量约占年径流量的49.5%。

对于上述两种年型降雨径流分布特点的分析表明,降雨季节分布不同会对径流产生影响,其中,对径流峰值产生的影响巨大。若降雨量大而且集中在个别月份,将使得径流总量及峰值流量较大,且其年内径流分布非常集中,汛期月径流量极大,如1994年型降雨;若全年降雨在分布上相对平均,在几个月内降雨量较大但相差不大则径流总量及径流峰值将不会过大,其年内径流分布也较平均,汛期流量不会集中在一两个月内。如1999年型降雨。因此,当预测到某年的降雨在年内个别月相对集中且降雨量较大时,应提前做好防洪准备,尤其当注意洪峰流量的控制。

### 5 结论与讨论

本文采用经验证的GBHM模型,研究了潮白河流域降水演变及其径流效应。结果表明:潮白河流域径流受降雨变化影响大,对于年内分布不同的年型降雨,尽管年降雨量一定,但其径流量出现很大差别。在年降雨总量相同情况下,降雨年内分布集中的年份径流总量及峰值流量非常大,降雨年内分布较平均的年份径流总量及峰值流量相对较小。对于径流总量和峰值流量最大的1994年和1999年进行单独分析得出,1994年型径流总量是1999年型径流总量的3.88倍;1994年型峰值流量是1999年型峰值流量的35.87倍。1994年内降雨主要集中在7、8月,占全年降雨量的78.0%,而其7、8月径流量占年径流量的76.4%,汛期非常集中且径流量大。1999年降雨量在汛期相对平均分布,7、8两个月降雨量仅占全年降雨量的43.8%。7~10月径流量约占年径流量的49.5%。本研究主要分析了降水的年内分布特征对径流的影响,没有分析降水的空间分布对径流的影响,主要是考虑到潮白河流域面积不算太大,降水空间分布对径流影响居于次要地位,限于篇幅本文没有做深入分析,进一步研究将考虑降水的空间变异对径流的影响。

## 参考文献:

- [1] Karl T R, Knight R W, Easterling D R, et al. Indices of climate change for the United States [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996,77(2):279–292.
- [2] Muller C J, O’Gorman P A. An energetic perspective on the regional response of precipitation to climate change [J]. *Nature Climate Change*, 2011,1(5):266–271.
- [3] Rahmani V, Hutchinson S L, Hutchinson J M S, et al. Extreme daily rainfall event distribution patterns in Kansas [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2013,(2).
- [4] Mendizabal M, Sepúlveda J, Torp P. Climate change impacts on flood events and its consequences on human in Deba River [J]. *International Journal of Environmental Research*, 2014,8(1).
- [5] 严华生,万云霞,邓自旺,等. 用正交小波分析近百年来中国降水气候变化[J]. *大气科学*, 2004,28(1):151–157. (YAN Huasheng, WAN Yunxia, DENG Ziwan, et al. Orthogonal wavelet analysis of the variations of the recent 100–years Precipitation in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2004,28(1):151–157. (in Chinese))
- [6] 牛存稳,张利平,夏军. 华北地区降水量的小波分析[J]. *干旱区地理*, 2004,27(1). (NIU Cunwen, ZHANG Liping, XIA Jun. Wavelet analysis on the precipitation in north China [J]. *Arid Land Geography*, 2004,27(1). (in Chinese))
- [7] 张磊,王晓燕. 潮白河流域水文要素特征分析 [J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2010,31(1):65–68. (ZHANG Lei, WANG Xiaoyan. Character analysis of hydrologic factors in Chaobai River basin [J]. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2010,31(1):65–68. (in Chinese))
- [8] 叶佰生,赖祖铭,施雅风. 气候变化对天山伊犁河上游河川径流的影响 [J]. *冰川冻土*, 1996,18 (1):29–36. (YE Maisheng, LAI Zuming, SHI Yafeng. The effect of climate change on runoff in the Yili River in the Tianshan mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996,18(1):29–36. (in Chinese))
- [9] 王云璋,康玲玲,王国庆. 近 50 年黄河上游降水变化及其对径流的影响[J]. *人民黄河*, 2004,26(2):5–7. (WANG Yunzhang, KANG Lingling, WANG Guoqing. Changes in precipitation upstream of the Yellow River for nearly 50 years and its impact on runoff [J]. *Yellow River*, 2004,26(2):5–7. (in Chinese))
- [10] 许继军,杨大文,刘志雨,等. 长江上游大尺度分布式水文模型的构建及应用 [J]. *水利学报*, 2007,38(2):182–190. (XU Jijun, YANG Dawen, LIU Zhiyu, et al. Large scale distributed hydrological model and its application to the upstream of Yangtze River [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007,38(2):182–190. (in Chinese))
- [11] 王磊,王忠静,尹航,等. GBHM 模型原理及其在中尺度流域的应用[J]. *冰川冻土*, 2006,28(2):256–261. (WANG Lei, WANG Zhongjing, YIN Hang, et al. A distributed hydrological model—GBHM and its application in middle–scale catchment [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006,28(2):256–261. (in Chinese))
- [12] 高冰,杨大文,谷湘潜,等. 基于数值天气模式和分布式水文模型的三峡入库洪水预报研究[J]. *水力发电学报*, 2012,(1):5. (GAO Bing, YANG Dawen, GU Xiangqian, et al. Flood forecast of Three Gorges reservoir based on numerical weather forecast model and distributed hydrologic model [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012,(1):5. (in Chinese))
- [13] 许继军,杨大文. 基于分布式水文模拟的干旱评估预报模型研究 [J]. *水利学报*, 2010, 41(6). (XU Jijun, YANG Dawen. New model for drought estimation and prediction based on distributed hydrological simulation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010,41 (6). (in Chinese))
- [14] 李苗苗,吴炳方,颜长珍,等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J]. *资源科学*, 2004,26(4):153–159. (LI Miaomiao, WU Bingfang, YAN Changzhen, et al. Estimation of vegetation fraction in the upper basin of Miyun reservoir by remote sensing [J]. *Resources Science*, 2004,26(4):153–159. (in Chinese))

## Evolution of Precipitation and Runoff Effects in Chaobaihe River Basin

CHEN Silan<sup>1</sup>, LIU Jiahong<sup>1,2</sup>, WANG Hao<sup>1,2</sup>, YANG Hanbo<sup>3</sup>, SHAO Weiwei<sup>1</sup>, GAO Xuerui<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Engineering and Technology Research Center for Water Resources and Hydroecology of the Ministry of Water Resources, Beijing 100044, China; 3. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** This paper analyzed the Chaobai River Basin 1991–2000 spatial and temporal evolution of precipitation data, using the same–rate amplifying method to handle precipitation data of each year for overall rotation. After each treatment, the total rainfall for each year is the 1991–2000 average annual precipitation. Then based on GBHM (Geomorphology–Based Hydrological Model) model, we simulated the runoff of 10 years. The results show that in the same situation of total precipitation, spatial and temporal distribution of precipitation in 1994 is the most beneficial type for runoff, and its total runoff volume and peak flow reach maximums. The total runoff volume and peak flow in the 1999 type are minimums. The total runoff volume in the 1994 type is 3.88 times the total runoff volume in the 1999 type; the peak flow in the 1994 type is 35.87 times the peak flow in the 1999 type. Thus, with the same amount of precipitation, its spatial and temporal distribution has enormous impacts on the total runoff volume and peak flow.

**Key words:** evolution of precipitation; runoff; distributed hydrological model; Chaobaihe River Basin