

# 黄土高原河龙区间最大日雨量(PMP) 极值拟合及时空演变特征

马 芹<sup>1</sup>, 张晓萍<sup>1,2</sup>, 万 龙<sup>1</sup>, 马瞳宇<sup>1</sup>, 孙艳萍<sup>1</sup>, 徐金鹏<sup>1</sup>, 雷泳南<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**黄土高原河龙区间暴雨可以造成极为严重的土壤侵蚀。为了探究河龙区间暴雨重现期的分布及变化规律,利用河龙区间及毗邻地区 24 个气象站点 1957—2009 年日降雨数据,分别用 Gumbel 分布和 GEV 分布模拟最大日雨量辨析这两种拟合方法的适用性,在此基础上,分析降雨极端事件的时空演变特征。结果表明:(1)对于短重现期( $\leq 10$  a),两种分布模拟值最大日雨量(PMP)值相差较小;而在长重现期( $\geq 20$  a)的水平上,GEV 模拟精度较高。但若站点出现几次大暴雨且雨量相近的情况下,Gumbel 模拟精度高于 GEV 模拟精度。(2)结合 GEV 分布和 Gumbel 分布,对河龙区间各站点的最大日雨量进行模拟。河龙区间 2 a, 5 a, 10 a, 20 a, 50 a, 100 a 重现期的 PMP 分别介于 40~70, 50~85, 60~100, 70~110, 85~130, 95~150 mm。河龙区间各重现期的最大日雨量的高值中心均分布在南部延河流域和西北部窟野河流域,而低值中心在西部横山以西和东北部偏关河以北地区。用 3 个时段数据(1950s—1960s, 1970s—1980s, 1990s—2000s)估算的 5 个代表站的最大日雨量值差异明显,在太原、榆林两站,1950s—1960s 估算的最大日雨量较大,最大日雨量呈减少趋势。而在其它 3 个站点,均为 1970s—1980s 估算的最大日雨量较大。

**关键词:**时空演变; 极值拟合; 最大日雨量; 河龙区间; 黄土高原

中图分类号:P468.0<sup>+</sup>24

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)02-0071-06

## Fitting of the PMP Values and Identifying Its Spatiotemporal Characteristics in the Helong Section on the Loess Plateau

MA Qin<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-ping<sup>1,2</sup>, WAN Long<sup>1</sup>, MA Tong-yu<sup>1</sup>, SUN Yan-ping<sup>1</sup>, XU Jin-peng<sup>1</sup>, LEI Yong-nan<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** There is high frequency of the heavy precipitation events in the Helong Section on the Loess Plateau. And the heavy precipitation events can cause severe soil erosion. The paper deals with the estimation of the return period of precipitation extremes in the Helong Section on the Loess Plateau. In this study, the daily precipitation datasets at 24 meteorological stations from 1957—2009 were used to estimate the probable maximum precipitation (PMP) in the Helong Section. Two extreme distribution models of probability estimations were compared to identify the applicability: the GEV distribution and the Gumbel distribution. The spatiotemporal characteristics for the extreme events were detected. The results showed that: (1) for the return period less than 10 years, there was little difference between the two distributions for estimation of the PMP. But for the return period greater than 20 a, the GEV distribution was properly more than the Gumbel distribution to estimate the PMP in the Helong Section. When there were several heavy precipitation events with the similar precipitation values, the Gumbel distribution is properly more than the GEV distribution; (2) the PMP values in the Helong Section for the return period of 2 a, 5 a, 10 a, 20 a, 50 a, 100 a were between 40~70, 50~85, 60~100, 70~110, 85~130, 95~150 mm, respectively. The PMP value for a given return period was higher in the Yan-

收稿日期:2011-07-27

修回日期:2011-09-14

资助项目:黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室专项经费(10502-Z12-1)“水蚀风蚀交错区侵蚀环境演变的地学-生物学过程及其调控”

作者简介:马芹(1986—),女,硕士研究生,主要研究方向:GIS/RS在水土保持中的应用。E-mail:mq\_hmily@sina.com

通信作者:张晓萍(1971—),女,研究员,主要研究方向:土地利用/覆被变化环境效应。E-mail:zhangxp@ms.iswc.ac.cn

he River in the south and in the Ordos Desert in the northwestern Helong Section. However, it was lower in the northeastern part. The PMP values estimated by the daily precipitation data of the three period of 1950s—1960s, 1970s—1980s, 1990s—2000s were varied. The PMP values estimated by the datasets of 1950s—1960s in the Taiyuan and Yulin stations were higher. However, at the Dongsheng, Xingxian and Yanan stations, the estimated PMP values were higher for the datasets of 1970s—1980s.

**Key words:** PMP; GEV distribution; Gumbel distribution; Helong Section; Loess Plateau

近年来,极端气候的变化及其引发的自然灾害已引起人们的普遍关注<sup>[1]</sup>,其中暴雨是主要的灾害性气候之一。重现期很长的暴雨(如百年一遇的特大暴雨)发生时所造成的破坏往往是毁灭性的,在生态环境极为脆弱的黄土高原更是如此。黄土高原河龙区间植被覆盖率低,土地退化严重,暴雨发生频繁。河龙区间的广大地区年均暴雨 3~5 次,几乎每年都有暴雨发生,且暴雨强度大,区间分布有延河、清涧河暴雨区和无定河暴雨区<sup>[2]</sup>。暴雨发生时可造成严重的水土流失和生态破坏<sup>[3]</sup>,并给农业生产带来极大的危害;同时强暴雨可引起山洪暴发,江河水位上涨,甚至冲毁堤坝,给人民生命财产的安全带来极大的威胁<sup>[4]</sup>。因此,对一定重现期的暴雨雨量进行估算,并研究其空间分布及变化趋势,可为重大水利工程建设提供设计依据,也可防治农业灾害及土壤侵蚀提供重要的科学依据<sup>[5-6]</sup>。

目前,用极值分布模型对暴雨极值进行拟合分析,从而估算一定重现期的可能最大日雨量(PMP)是研究暴雨及其分布规律的重要手段<sup>[7]</sup>。GEV (Generalized extreme value distribution)分布模型和 Gumbel 分布模型是两种常用的分布模型,但两种模型都有各自的优缺点。在一些地区,Gumbel 分布能较好地反映某些气象要素包括降水的极值分布<sup>[8]</sup>,但 Gumbel 分布公式拟合 PMP 一般偏小,在资料系列较短时,用此法求得的高标准暴雨洪水带来风险较大<sup>[9]</sup>。GEV 方法通过对三种极值分布函数的统一,解决了只能用一种极值分布函数进行拟合的局限性<sup>[10]</sup>。但有学者指出,GEV 分布拟合在局地有特大暴雨时,一般拟合较差<sup>[11]</sup>。故本文利用河龙区间的 24 个气象站点的不同时间尺度的日降雨量数据,结合 GEV 分布和 Gumbel 分布模型,对河龙区间的 PMP 进行估算,并分析河龙区间的 PMP 的空间分布及变化规律。

## 1 研究区概况

内蒙古河口镇—陕西龙门区间(河龙区间)是黄河中游处于山西—陕西交界的区域,面积约 11.3 万 km<sup>2</sup>,西北部地处毛乌素沙地,东南部以黄土丘陵沟

壑地貌为主,海拔 450~2 000 m,切割深度 100~500 m,地表割裂度 30%~70%。河龙区间属于大陆性干旱半干旱气候,降雨量由东南向西北递减,东南部湿润地区多年平均降雨量可达 590 mm,而西北部地区降雨量仅为 300 mm 左右。河龙区间年内降雨集中于 5—9 月,受地形和地理位置的影响,夏季多暴雨,高强度的暴雨引起剧烈的土壤侵蚀,河龙区间每年输入黄河的泥沙占三门峡以上总输沙量的 70% 以上<sup>[12]</sup>。河龙区间大部分地区植被稀疏,区域内植被以草原为主,北部为典型草原和荒漠草原,南部为灌丛草原、草甸草原和森林草原。区间内黄绵土广泛分布,因其质地疏松且为垂直节理,易受侵蚀。

## 2 数据资料和方法

### 2.1 数据资料

黄河中游河龙区间及毗邻区共包括 24 个气象站点的日降雨数据从国家气象站获得,站点分布经纬度范围为 106.5°—113.5°E,35°—40.5°N。分别利用 GEV 分布和 Gumbel 对河龙区间的日降雨量数据进行模拟,采用 KRIGING 方法插值一定重现期的 PMP 的空间分布,插值设置投影参数为:采用 Albers 等积投影,第 1 条纬线:N25°,第 2 条纬线:N47°,中央经线:E110°。插值栅格为 500 m×500 m。

### 2.2 方法

极值分布是指气候要素中最大值或最小值的概率分布。在气象概率统计中极值分布常用三种概率分布函数对气候要素的极值进行拟合<sup>[13-14]</sup>。

(1) Gumbel 分布(极值 I 型)

$$G(z; u, \sigma, \xi) = \exp\{-\exp[-(\frac{z-u}{\sigma})]\} - \infty < z < \infty \quad (1)$$

(2) Frechet 分布(极值 II 型)

$$G(z; u, \sigma, \xi) = \begin{cases} 0 & z \leq u \\ \exp[-(\frac{z-u}{\sigma})^{-1/\xi}] & z > u \end{cases} \quad (2)$$

(3) Weibull 分布(极值 III 型)

$$G(z; u, \sigma, \xi) = \begin{cases} \exp[-(\frac{z-u}{\sigma})^{-1/\xi}] & z < u \\ 0 & z \geq u \end{cases} \quad (3)$$

上述分布函数中, $u$  为位置参数, $\sigma$  为尺度参数, $\xi$

为形状参数。三种极值分布函数各有特点,Weibull 分布值存在上限,意味着其最大值不能超过一个固定值;Frechet 概率密度分布函数比 Gumbel 概率密度分布尾部更长,从而大极值出现的可能性更大。

考虑到位置参数和尺度参数,可以将以上三种极值分布函数统一用广义极值分布(GEV)理论来描述,其分布函数为

$$G(z; u, \sigma, \xi) = \exp\{-[1 + \xi(z - u)/\sigma]_+^{-1/\xi}\} \quad (4)$$

式中: $u$ ——位置参数; $\sigma$ ——尺度参数; $\xi$ ——形状参数; $X_+ = \max(x, 0)$ 。当形状参数  $\xi < 0$  时,分布函数为 Weibull 分布;当  $\xi = 0$  时,分布函数为 Gumbel 分布;当  $\xi > 0$  时,分布函数为 Frechet 分布。

广义极值分布的参数可用极大似然法、L 距法进行估计。文中采用 L 距法对分布的拟合参数进行估计,其计算方法参见文献[15]。

### 3 结果与分析

#### 3.1 GEV 分布和 Gumbel 分布模拟结果比较

利用河龙区间 1957—2009 年的 24 个站点日降雨量数据,分别采用 GEV 分布和 Gumbel 分布对各站点不同重现期的 PMP 进行模拟,与经验频率分布的实际值进行比较(图 1)。分别对 2 a, 5 a, 10 a, 20 a, 50 a 重现期的 PMP 模拟,GEV 分布模型的模拟结果显示,对于 80% 以上的站点,模拟值均比实际值偏小,模拟值与实际值的差值也大多在 10 mm 以内。而仅有少量站点,如榆林、横山、延安、吴起等的模拟值比实际值偏大,这些站点主要分布在河龙区间中部地区。而 Gumbel 分布模型的模拟结果显示,大部分的模拟值均比实际值偏小,偏小误差大多在 15 mm 以内。

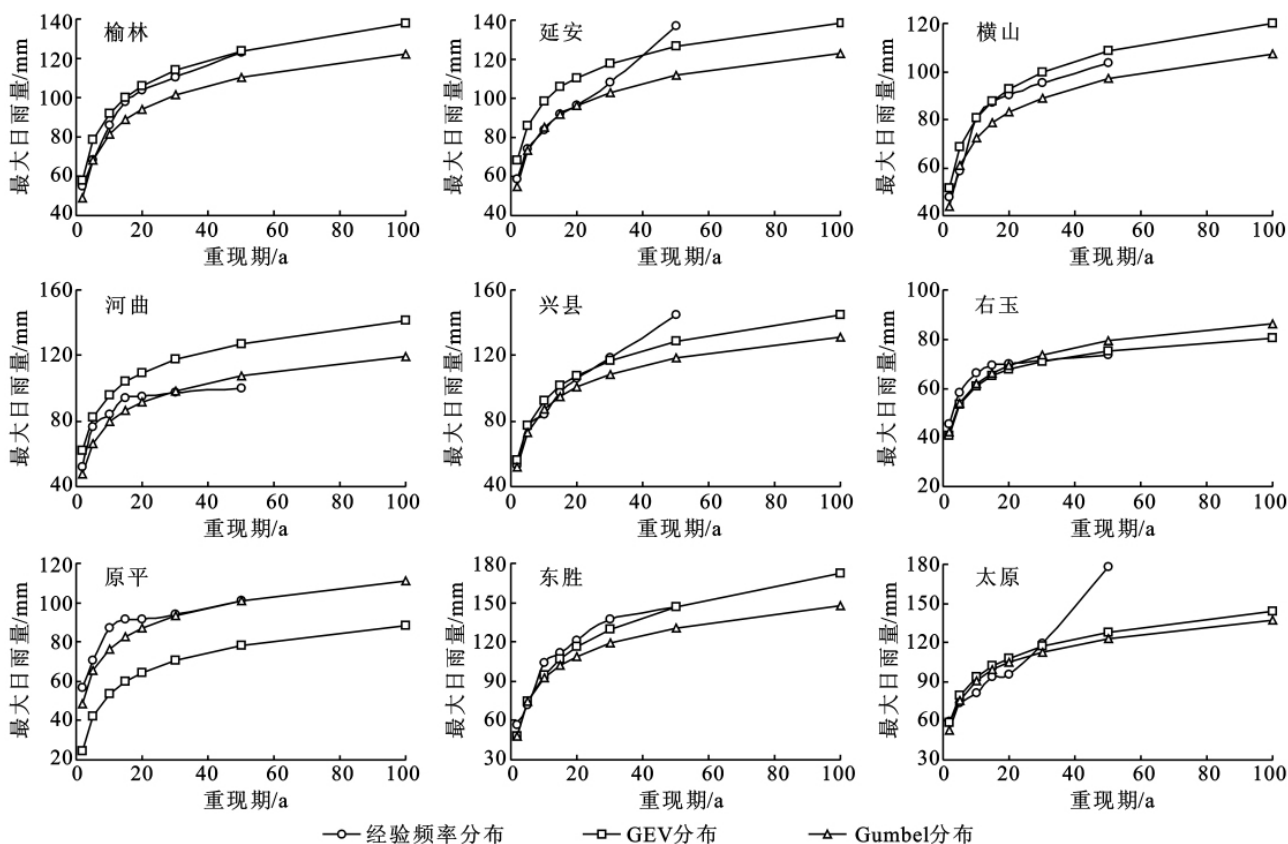


图1 GEV、Gumbel 和经验频率分布对河龙区间气象站点的 PMP 模拟

比较 GEV 分布和 Gumbel 分布的模拟值与经验频率分布的实际值的误差,结果显示,在大部分站点,对于短重现期( $\leq 10$  a),用 GEV 分布和 Gumbel 分布估算的 PMP 值相差较小;对于 20 a 和 50 a 重现期的 PMP 值的模拟,GEV 分布的模拟误差一般小于 Gumbel 分布的模拟误差。对于 50 a 重现期的 PMP 的模拟,GEV 模拟误差比 Gumbel 模拟误差一般小 10~15 mm;而对于 20 a 重现期的 PMP 的模拟,

GEV 模拟误差比 Gumbel 模拟误差一般小 5~10 mm。

然而,在山西地区的介休、原平、河曲、右玉、大同、临汾等站点,Gumbel 分布模拟精度显著优于 GEV 分布的模拟精度。如在原平和河曲,50 a 重现期的 GEV 分布模拟 PMP 值分别为 78.2 mm 和 127.4 mm,而近 53 a 来原平和河曲的实际最大日雨量值仅为 101.8 mm 和 100.2 mm(表 1)。

表 1 河龙区间各站点 53 a 中最强次暴雨日雨量

mm

榆林	横山	延安	右玉	河曲	兴县	临汾	东胜	鄂托克旗	介休	太原	原平
124.3	103.9	139.9	74	100.2	147.1	104.4	147.9	175.1	120.5	183.5	101.8
105.7	92.3	98.1	70.4	96.0	110.2	103.5	133.4	105.2	84.9	99.4	91.5
102.9	88.7	95.5	69.5	94.2	104.1	91.7	114.2	93.4	83.0	93.5	91.5
93.1	85.1	88.4	68.7	94.0	90.8	90.6	108.4	91.3	82.9	92.6	91.4
87.1	82.0	84.1	68.4	84.1	84.5	85.0	108.2	88.6	82.0	83.0	88.1
83.2	77.5	84.0	61.6	83.9	81.6	82.6	94.0	73.5	79.6	76.6	83.6
78.2	69.7	81.3	61.0	82.4	80.8	77.2	85.3	66.0	78.8	76.6	77.2
74.7	64.5	79.9	59.5	80.4	78.3	76.2	83.5	65.0	78.4	75.5	75.4
70.4	59.5	78.4	59.4	79.3	77.4	75.6	81.1	56.4	77.8	75.4	72.3
68.0	59.0	74.1	58.9	77.6	77.3	74.3	73.4	56.3	71.7	73.9	71.0
67.9	58.3	73.8	57.8	75.7	76.7	72.5	70.9	56.3	71.4	73.3	70.1
67.3	57.5	72.2	56.3	72.7	73.3	71.7	70.7	54.6	70.5	72.9	68.4

仅由日降雨数据观察其原因,可能是因为该站点较大的几次暴雨中有较相近的暴雨量,对 GEV 分布模拟精度影响较大。如在河曲出现过两次 94 mm 的暴雨量,而在原平出现了 3 次 91 mm 的暴雨量,在介休曾出现 3 次 83 mm 的暴雨量(表 1)。

对于太原、鄂托克旗等站点,近 53 a 来均出现了大于 170 mm 的日雨量,而两种分布用 53 a 尺度数据估算的 100 a 重现期的日最大雨量仅为 120 mm 左右,均不能准确反映出这样高强度的暴雨雨量。

### 3.2 河龙区间不同重现期 PMP 的空间分布

由于 GEV 模拟较长重现期(20 a 以上)的 PMP,

模拟效果较好,故本文大多数站点用 GEV 分布对河龙区间的 PMP 进行估算;而由于 Gumbel 分布对山西地区介休、河曲、原平、离石、右玉、大同、临汾等站点 PMP 的模拟效果较好,故用 Gumbel 分布对以上站点进行估计;而太原和鄂托克旗的 50 a 以上重现期的 PMP 值利用经验频率分布拟合 PMP 值。各重现期 PMP 的空间分布见图 2。

由图 2 可以看出,河龙区间 2 a,5 a,10 a,20 a,50 a,100 a 重现期的 PMP 分别介于 40~70 mm,50~85 mm,60~100 mm,70~110 mm,85~130 mm,95~150 mm。

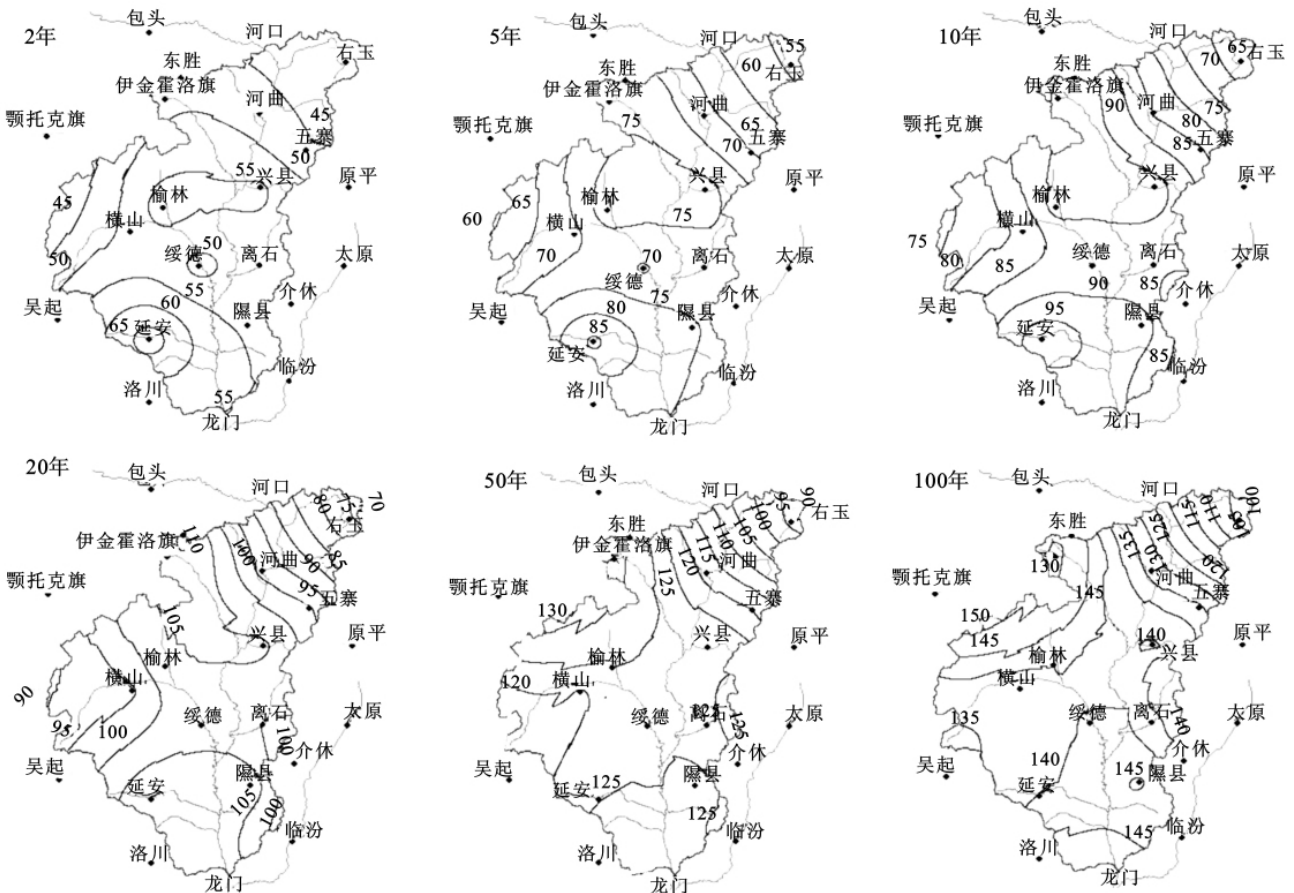


图 2 河龙区间各重现期 PMP 空间分布

各重现期的 PMP 在不同地区差异显著。在西部的横山以西地区、东北部的偏关河以北地区,各重现期的 PMP 值较少,如在东北部的右玉站点,50 a 重现期的 PMP 仅为 90 mm 左右,而在西北部的东胜、榆林、南部的延安等地区,10 a 重现期的 PMP 已经达到了 90 mm 以上。

各重现期 PMP 的高值中心均呈现在南部延河流域和西北部窟野河流域,对于 2 a、5 a 和 10 a 重现期的 PMP 的空间分布,均呈现出以榆林和延安为高值中心向四周减少的趋势,而对于 20 a、50 a、100 a 重现期的 PMP,高值中心逐渐向东南和西北移动。西北地区的高值中心逐渐移至毛乌素沙地地区的东胜、伊金霍洛旗、鄂托克旗等站点,而东南逐渐移向运城和太原站点。可以看出,在毛乌素沙地的腹地东胜、伊金霍洛旗、鄂托克旗等地,50 a、100 a 的极端暴雨强度较高,加之此地区的植被覆盖率很低,这种强度高的大暴雨常导致极为严重的水土流失和生态破坏。

### 3.3 河龙区间最大日雨量的时间变化

在河龙区间不同方向和位置,根据不同地貌类型选取 5 个典型站点,用 20 a 尺度的日降雨量数据,估计各站点 PMP 的变化情况。这 5 个站点分别为:位于河龙区间西北部风沙区的东胜站点,中部风沙—黄土丘陵过渡区的榆林站点,南部典型黄土丘陵区的延安站点,以及东部山西高原的兴县站点和曾出现 170 mm 以上极端暴雨的太原站点。所用数据时间段划分为:1950s—1960s, 1970s—1980s, 1990s—2000s。由于数据的缺失,5 个站点在 1950s 的起始时间分别为:东胜(1957 年)、榆林(1951 年)、延安(1952 年)、兴县(1955 年)、太原(1951 年)。

由于 GEV 分布对 20 a 重现期以上的极端暴雨拟合精度较好,应用 GEV 分布估算所选 5 个站点的 PMP,发现 3 个时段数据估算结果差异较大(图 3)。

在榆林和太原站点,用 1950s—1960s 时段数据估算的 PMP 值较大,100 a 重现期的 PMP 已经超过 200 mm,10 a 重现期的 PMP 已经超过 90 mm。而用 1970s—1980s 估算的 PMP 值较小,100 a 重现期的 PMP 仅为 94.2 mm 和 80.5 mm。说明榆林和太原站点在 1950s—1960s 时段出现极端暴雨的风险较大,10 a 及更长重现期的极端日雨量有减少趋势。

而在延安、东胜和兴县站点,分别用 3 个时段数据估算其 PMP 值,结果表明:3 个站点均表现为用 1970s—1980s 时段数据估算的 PMP 值较大,其估算的 100 a 重现期 PMP 在 3 个站点均大于 150 mm(分别达到了 156.9、192.4、169.6 mm),10 a 重现期的 PMP 也达到了 100 mm 左右。而用 1990s—2000s 时

段数据估算延安站点的 100 a 重现期的 PMP 仅为 98.3 mm,用 1950s—1960s 时段数据估算兴县站点 100 a 重现期的 PMP 值仅为 113.5 mm,10 a 重现期的 PMP 仅为 60~70 mm。说明在这 3 个站点,1970s—1980s 极端暴雨出现的风险较大,且实际数据也表明,在这 3 个站点,1970s—1980s 时间段暴雨出现的频率较高。在延安和东胜站点,1970s—1980s 出现了两次大暴雨,分别达到了 139.9 mm 和 147.1 mm,而在兴县站点,出现了 3 次 100 mm 以上的暴雨。

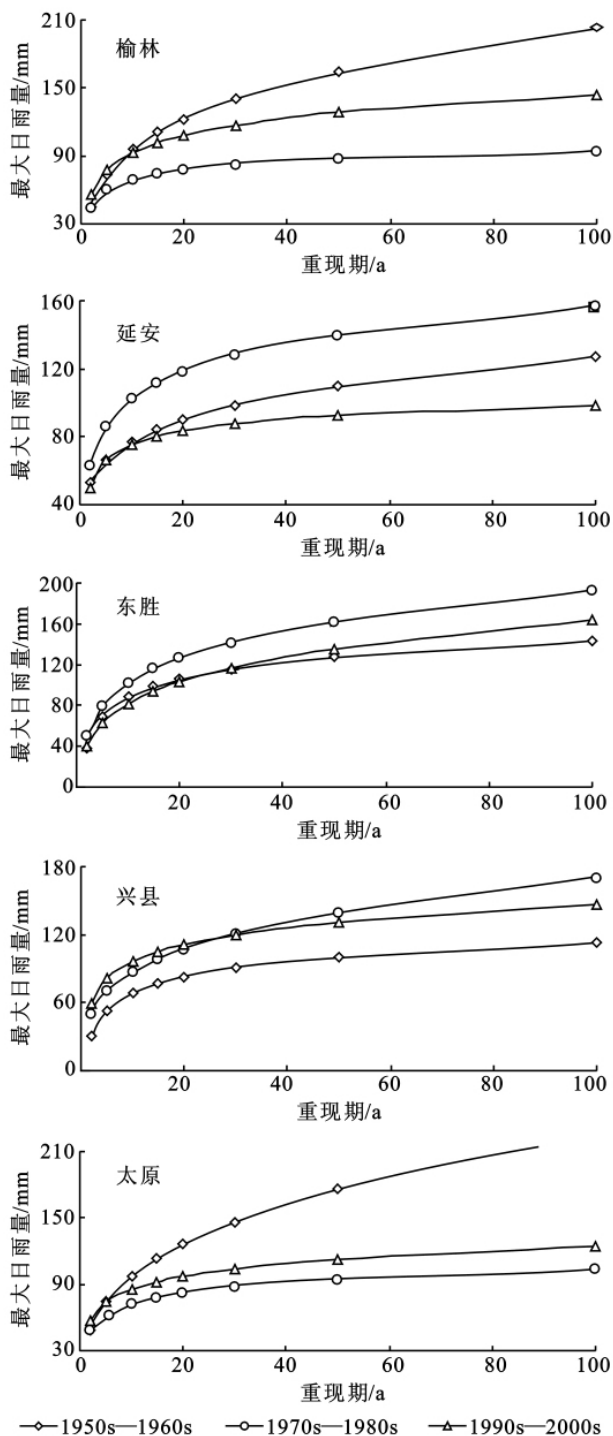


图3 GEV分布用3个时段数据对河龙区间气象站点的PMP模拟

在东胜,三个时段数据估算的 100 a 重现期的 PMP 值均大于 140 mm,10 a 重现期的 PMP 值也均大于 90 mm,说明东胜在 20 a 尺度上出现 140 mm 以上的极端暴雨事件的概率要高于其它地区。

## 4 结 论

(1) Gumbel 分布和 GEV 分布都能较好地模拟河龙区间各站点的最大日雨量,两种分布的模拟值均比实际值偏小。对于短重现期( $\leq 10$  a) PMP 值的估计,GEV 分布的模拟值与 Gumbel 的模拟值相差较小;而在长重现期( $\geq 20$  a)的水平上,GEV 模拟精度较高,如对于 50 a 重现期的 PMP 的模拟,GEV 模拟误差比 Gumbel 模拟误差小约 10~15 mm。但若站点出现几次大暴雨且雨量相近的情况下(如河曲、离石、原平等站),Gumbel 模拟精度远高于 GEV 模拟精度。

(2) 用 GEV 分布和 Gumbel 分布结合起来估计最大日雨量。河龙区间 2 a, 5 a, 10 a, 20 a, 50 a, 100 a 重现期的最大日雨量分别介于 40~70, 50~85, 60~100, 70~110, 85~130, 95~150 mm。各重现期的最大日雨量的高值中心均分布在南部延河流域和西北部窟野河流域,而低值中心在西部的横山以西和东北部的偏关河以北地区。用 20 a 尺度数据估算最大日雨量的结果表明,在太原、榆林两站,1950s—1960s 估算的最大日雨量较大,而在其它 3 个站点,均为 1970s—1980s 估算的最大日雨量较大。说明在榆林和太原 1950s—1960s 出现 20 a 重现期以上的极端暴雨的风险较大,且极端暴雨呈减少趋势,而在其它站点,1970s—1980s 出现 20 a 重现期以上的极端暴雨的风险较大。

### 参考文献:

- [1] 钱维宏,符娇兰,张玮玮,等.近 40 年中国平均气候与极值气候变化的概述[J].地球科学进展,2007,22(7):673-684.
- [2] 蒋定生.黄土高原水土流失与治理模式[M].北京:中国水利水电出版社,1997:83-92.
- [3] 周佩华,王占礼.黄土高原土壤侵蚀暴雨的研究[J].水土保持学报,1992,6(3):1-5.
- [4] D'Onofrio E E, Fiore M M E, Romero S I. Return periods of extreme water levels estimated for some vulnerable areas of Buenos Aires[J]. Continental Shelf Research, 1999, 19(13): 1681-1693.
- [5] 尹文有,郑皎,王继红,等.年最大日雨量极值分布拟合与推算[J].气象科技,2011,39(2):138-140.
- [6] 姚莉,赵声蓉,赵翠光,等.我国中东部逐时雨强时空分布及重现期的估算[J].地理学报,2010,65(3):293-300.
- [7] 刘光文.水文分析与计算[M].北京:水利电力出版社,1989.
- [8] 李燕,朱桂林,刘强,等.南四湖流域暴雨分布特征及可能日最大降水量计算[J].气象科技,2010,38(1):75-77.
- [9] 魏生生.国内外求算可能最大降雨量研究的综述[J].气象科技,1998(1):16-22.
- [10] 陈兴旺.广义极值分布理论在重现期计算的应用[J].气象与减灾研究,2008,31(4):52-54.
- [11] Karim M D A, Chowdhury J U. A comparison of four distributions used in flood frequency analysis in Bangladesh[J]. Hydrological Sciences Journal, 1995, 40(1): 55-66.
- [12] 冉大川.黄河中游河口镇至龙门区间水土保持与水沙变化[M].郑州:黄河水利出版社,2000.
- [13] Jenkinson A F. The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) value of meteorological elements[J]. Quart. J. Roy. Met. Soc., 1955, 81(348): 158-171.
- [14] Jenkinson A F. Estimation of Maximum Floods[M]. Switzerland: World Meteorological Organization, Geneva, 1969.
- [15] Kysely J. Probability estimates of extreme temperature events: stochastic modelling approach vs extreme value distributions[J]. Stud. Geophys. Geod., 2002, 46(1): 93-112.