

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.03.011

# 无资料地区不同时间尺度下流量历时曲线 推演及其规律分析

姬宏伟, 白 涛, 刘登峰, 栾金凯, 慕鹏飞

(西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 为发展流域水文相似与分类理论, 提高无资料地区的水文预测水平, 以渭河流域支流 8 个代表性水文站为研究对象, 利用建模 FDC 参数比较(M-FDC-P)方法进行日径流序列模拟, 通过均方根误差(RMSE)、纳什效率系数(NSE)确定最佳模型和模型的最优参数, 分析不同时间尺度下经验流量历时曲线(FDC)的模型参数之间的相关关系。主要研究结果如下:①不同时间尺度下经验 FDC 随着时间尺度变大而趋于平坦, 且当时间尺度在 1 d 到 30 d 时, 经验 FDC 非常相似, 当时间尺度大于 90 d 时, 经验 FDC 会出现明显的差异;②基于 RMSE 和 NSE 量化值, 当时间尺度在 1 d 到 30 d 时, Gamma 分布拟合效果最好, 其次是对数正态分布, 最差的是指数分布, 因此本文选择 Gamma 分布作为日径流模拟的最优概率分布;③Gamma 分布的三个参数在 1~30 d 不同时间尺度上具有明显的相关性, 且随着时间尺度的增大, 相关性逐渐变差, 其中参数  $c$  的相关性最好, 参数  $a$  和  $b$  的相关性较弱。结果表明, 采用特定概率分布进行大时间尺度 FDC 建模时, 可以通过流量分布的内在联系得到日径流过程, 用于估计无资料地区的日径流过程。研究成果可为无实测数据区域的水利工程规划提供参考, 特别是渭河流域。

**关键词:** 流量历时曲线; Gamma 函数; 参数关系; 无资料地区; 渭河流域

**中图分类号:** TV11      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1006-4710(2020)03-0342-07

## Deduction and law analysis of flow duration curve in different time scales in the ungauged basins

JI Hongwei, BAI Tao, LIU Dengfeng, LUAN Jinkai, MU Pengfei

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to develop the hydrological similarity and classification theory on river basins and improve the hydrological prediction level in the ungauged basins, this paper takes 8 representative hydrological stations in the tributaries of the Weihe River Basin as the research object; using the Modeling FDC Parameter comparison (M-FDC-P) for daily runoff simulation, determine the best model and optimal parameters through the Root Mean Square Error (RMSE) and Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE), it analyzes the correlation between the model parameters of the empirical flow duration curve (FDC) in different time scales. The main conclusions are as follow:①The empirical FDC in different time scales tends to be flat with time scale changes. The empirical FDC in 1d to 30d time scales are very similar. Obvious differences occur when the time scale is larger than 90 days;②Based on RMSE and NSE values, when the time scale is be-

收稿日期: 2020-08-28; 网络出版日期: 2020-09-28

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20200928.1022.004.html>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0405900); 中国博士后科学基金资助项目(2019T120933, 2017M623332XB); 陕西省博士后科研资助项目(2017BSHYDZZ53); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2019JLM-52, 2018JQ5145); 陕西省水利科技计划资助项目(2017slkj-16, 2017slkj-27)

第一作者: 姬宏伟, 男, 硕士生, 研究方向为水库调度。E-mail: jhwxaut@qq.com

通信作者: 白涛, 男, 博士, 副教授, 研究方向为水资源系统工程。E-mail: baitao@xaut.edu.cn

tween 1 d and 30 d, the Gamma distribution has the best simulating effect, the next is the log-normal distribution, and the exponential distribution is the poorest. Therefore, this paper chooses the Gamma distribution as the optimal probability distribution of daily runoff simulation; ③The three parameters of the Gamma distribution have obvious correlations in different time scales between 1 d and 30 d, and the correlation gradually worse as the time scales increases. Among them, the parameter  $c$  indicates strong correlation, and the parameters  $a$  and  $b$  indicate weak correlation. The results show that when a specific probability distribution is used for large-scale FDC modeling, the internal relations of the flow distribution can be used to obtain the daily runoff process, estimating the daily runoff process in the ungauged basins. The research results can provide references to water conservancy project planning in the ungauged basins, especially in the Weihe River Basin.

**Key words:** flow duration curve; Gamma function; parameter relation; ungauged basins; Weihe River Basin

无资料地区的水文预测问题(Prediction in Ungauged Basins, PUB)一直是水文学研究的重点和难点,得到了国内外众多学者的广泛关注<sup>[1]</sup>。流量历时曲线(Flow Duration Curve, FDC)是反映流量在某一时段内(或年内某一季节、一年)超过某一数值持续天数的一种统计特性曲线,其纵坐标为日平均流量,横坐标为超过该流量的累计日数,即历时。如横坐标用历时相对百分数表示,则为相对历时曲线,或称保证率曲线<sup>[2]</sup>。水利工程在设计时常需获取 FDC,以掌握工程所在地区的径流特征。但是,由于部分中小型规模的水利工程往往位于无实测径流资料地区,故无法直接由实测径流资料得到 FDC<sup>[3]</sup>。

长期以来,估计无资料地区 FDC 的方法主要分为两类<sup>[4]</sup>:一是基于水文过程和统计的方法预测无资料地区 FDC;二是根据物理成因机制,辅以流域水文模型以及降雨径流相关假设,最后将有资料地区的模型参数移植到无资料地区。其中,统计的方法主要包含回归方程<sup>[5-6]</sup>、地质学统计方法<sup>[7]</sup>等,这些统计方法因操作简单、易于实现而备受青睐<sup>[8-9]</sup>。例如,杨邦等<sup>[10]</sup>采用 FDC 作为水文模型的拟合目标,从而确定无资料地区的参数,为无资料地区水文模型参数的区域化提供了新思路;黄国如<sup>[11]</sup>通过对 FDC 的深入分析,得到了区域化的 FDC,为无资料地区的径流预测提供了一条简单有效的途径。

然而,上述研究主要集中在一定的时间尺度,很少涉及或分析不同时间尺度下 FDC 之间的关系,而不同时间尺度的 FDC 在水文学中的用法不同<sup>[12]</sup>,因此,本文着重研究不同时间尺度下 FDC 之间的关系。本文以渭河流域支流 8 个代表性水文站为研究对象,利用单一概率分布模型进行日径流序列模拟,阐明不同时间尺度下 FDC 的相关关系,以预测无资

料地区或仅有大时间尺度数据地区的日径流过程。研究成果可为无实测资料地区 FDC 的推演提供一条简便可靠的途径,并为无资料地区的水利工程规划、设计、施工和运行管理提供重要支撑。

## 1 区域概况及基本资料

渭河是黄河最大的支流,渭河流域位于黄土高原,分为西部黄土丘陵沟壑区和东部关中平原区两部分。受地形等因素影响,流域产汇流体现出明显的区域特征。流域内降水分布由东南向西北递减,南部秦岭山麓降水丰富,年最大降水量在 1 000 mm 以上,降水量随高程的降低而急剧减小,平原区年降水量约 500 mm。研究区资料包括渭河流域支流 8 个水文站(武山站(H01)、秦安站(H02)、天水站(H03)、凤阁岭站(H04)、安头站(H05)、黑峪口站(H06)、柳林站(H07)、马渡王站(H08))2001—2016 年的实测日平均流量数据,该数据来源于中华人民共和国水文年鉴(第 4 卷第 7 册)<sup>[13]</sup>。8 个水文站的基本资料如表 1 所示,研究区域如图 1 所示。

表 1 各站的主要统计参数

Tab. 1 Main statistical parameters of each station

水文站	编号	资料长度/a	流域面积/km <sup>2</sup>
武山	H01	16	8 080
秦安	H02	16	9 805
天水	H03	16	1 019
凤阁岭	H04	16	846
安头	H05	16	1 007
黑峪口	H06	16	1 481
柳林	H07	16	674
马渡王	H08	16	1 601

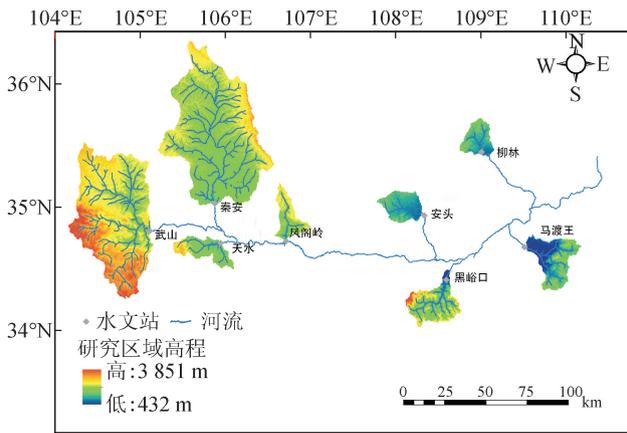


图1 水文站和研究区域图

Fig. 1 Hydrological station and study area map

## 2 研究方法

在日时间尺度上,由于日径流过程是一个复杂的时间序列,流量值范围横跨多个数量级,因而很难找到可以准确描述日径流的概率分布,因此,对日径流序列的模拟需要具有多个参数的复杂概率分布来完成<sup>[10]</sup>。

有多种方法可以对 FDC 进行建模,且不同方法适用的区域不同<sup>[14]</sup>。本文在以往研究的基础上,针对径流序列的特点、模型的复杂度以及分布参数的个数,选取了三种分布函数来估计年内日径流序列的概率分布,如表 2 所示,利用建模 FDC 参数比较(M-FDC-P)<sup>[14]</sup>,通过计算不同时间尺度下经验 FDC 参数,再基于 Nash-Sutcliffe 效率(NSE)和均方根误差(RMSE)评价拟合效果的优劣,得出适合该地区的最优分布函数及参数,最终分析参数相关性以得到不同时间尺度下 FDC 之间的相关关系。

表 2 分布函数

Tab. 2 Distribution function

函数名称	表达式	参数
指数函数	$y = ae^{-bx}$	$a, b$
Gamma 函数	$y = ax^{-b}e^{-cx}$	$a, b, c$
对数正态函数	$y = ae^{b(\ln x)^2}$	$a, b$

M-FDC-P 方法的步骤为:

步骤 1 经验 FDC 的估算。常用的绘制流量历时曲线的方法主要分为总历时法和多年平均历时法。总历时法是对记录期内所有日径流序列按照升序排序,然后求出各个流量的经验频率,从而得到 FDC 曲线;多年平均历时法(又称年内流量历时曲线)是先求出每年的 FDC,然后根据年内 FDC 求出中位数值(或均值),并给出相应的置信区间,其优势在于是利用统计的方法因而不受记录期内异常值的

干扰(异常枯水和洪水)。总历时法能够反映流域的真实径流特性,而多年平均历时法则反映流域多年平均的径流特性(该法 FDC 曲线是处理后的曲线)。因此,为了更真实地反映流域径流情况,本文将采用总历时法来绘制流量历时曲线图。

为了获得每个流量的超过概率,使用 weibull 分布,因为它提供了超出概率的无偏估计,而且可以不考虑满足底分布序列样本的排序<sup>[15]</sup>:

$$P\{X > x\} = 1 - \frac{i}{365n + 1} \quad (1)$$

式中: $i$  代表序列的排序位置; $n$  代表记录期年数。Vogel 和 Fennessey<sup>[15]</sup>给出了几种非参数方法用于绘制小样本量的 FDC 图,然而考虑到本文的样本量较大,因此选择 weibull 分布。

步骤 2 拟合经验 FDC。对于各站点不同时间尺度下的 FDC,分别利用指数函数、Gamma 函数、对数正态分布进行拟合,得到各个分布的参数。

步骤 3 评估 FDC 模型的可靠性和适用性。通过拟合得到具体的参数,就可以绘制由参数确定的 FDC。为了评估拟合 FDC 的优劣性,使用 Nash-Sutcliffe 效率(NSE)和均方根误差(RMSE)进行评价,得到最优概率分布。

步骤 4 参数相关性分析。通过分析不同时间尺度下最优概率分布参数的变化规律和评估分布参数之间的相关性来分析不同时间尺度下 FDC 之间的关系。

## 3 实例计算与分析

### 3.1 不同时间尺度下经验 FDC 的变化

为了阐明 FDC 随时间尺度的变化规律,分析各站在不同时间尺度下(1 d、7 d、15 d、30 d、90 d 和 365 d)的经验 FDC(分别对应于每日、每周、半个月、每月、每季度和年度 FDC)的变化规律。限于篇幅,本文只给出武山站在不同时间尺度下的经验 FDC,如图 2 所示。

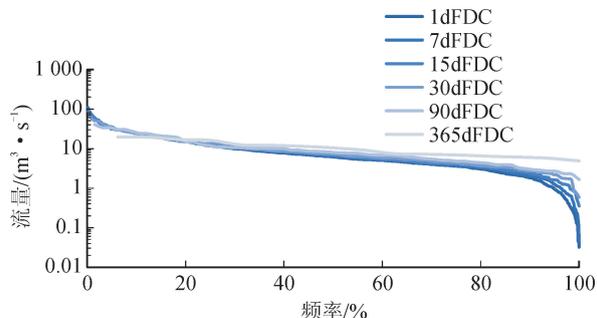


图 2 武山站经验流量历时曲线随时间尺度的变化  
Fig. 2 Empirical flow duration curve (FDC) variations with time scales for Wushan Station

由图 2 可以看出,经验 FDC 随时间尺度变化缓慢,FDC 在 1 d 的时间尺度上具有最大的斜率,然后随着时间尺度变大,曲线变得逐渐平坦;当时间尺度在 1 d~30 d 时,经验 FDC 非常相似;当时间范围大于 90 d 时,FDC 会出现明显的差异。其余 7 个站点的经验 FDC 的变化规律与武山站相同。

表 3 不同站点各分布函数的 NSE 值

Tab. 3 NSE values of distribution functions at different sites

水文站 编号	1 d FDC 的 NSE 值			7 d FDC 的 NSE 值			15 d FDC 的 NSE 值			30 d FDC 的 NSE 值		
	指数	Gamma	对数	指数	Gamma	对数	指数	Gamma	对数	指数	Gamma	对数
H01	0.758 9	<b>0.927 9</b>	0.801 8	0.746 8	<b>0.964 4</b>	0.545 9	0.770 3	<b>0.980 7</b>	0.623 1	0.813 5	<b>0.989 9</b>	0.647 0
H02	0.555 5	<b>0.828 3</b>	0.809 4	0.597 8	<b>0.768 7</b>	0.627 7	0.675 5	<b>0.794 9</b>	0.742 7	0.736 3	<b>0.790 3</b>	0.767 5
H03	0.469 7	<b>0.884 4</b>	0.781 2	0.500 3	<b>0.856 0</b>	0.750 0	0.630 2	<b>0.860 5</b>	0.706 5	0.668 6	<b>0.850 9</b>	0.813 0
H04	0.392 5	<b>0.966 3</b>	0.683 1	0.378 9	<b>0.982 6</b>	0.729 8	0.489 8	<b>0.988 6</b>	0.766 1	0.550 9	<b>0.979 9</b>	0.823 7
H05	0.200 9	0.745 6	<b>0.789 1</b>	0.220 3	<b>0.867 3</b>	0.716 2	0.240 5	0.890 1	<b>0.907 2</b>	0.301 7	0.911 0	<b>0.928 5</b>
H06	0.266 7	0.756 8	<b>0.915 7</b>	0.345 7	<b>0.874 6</b>	0.752 8	0.461 0	<b>0.844 8</b>	0.779 0	0.647 5	<b>0.878 6</b>	0.714 0
H07	0.327 5	<b>0.889 5</b>	0.713 7	0.284 1	<b>0.768 2</b>	0.648 7	0.357 1	<b>0.902 9</b>	0.735 1	0.414 4	<b>0.945 1</b>	0.760 7
H08	0.465 7	0.834 1	<b>0.862 6</b>	0.365 8	<b>0.904 0</b>	0.623 0	0.428 4	<b>0.978 6</b>	0.800 6	0.534 4	<b>0.960 0</b>	0.812 1
均值	0.430	<b>0.854</b>	0.795	0.430	<b>0.857</b>	0.674	0.507	<b>0.905</b>	0.758	0.583	<b>0.913</b>	0.783

注:加粗数字表示三个分布函数中最大 NSE 值。

表 4 不同站点各分布函数的 RMSE 值

Tab. 4 RMSE values of distribution functions at different sites

水文站 编号	1 d FDC 的 RMSE 值			7 d FDC 的 RMSE 值			15 d FDC 的 RMSE 值			30 d FDC 的 RMSE 值		
	指数	Gamma	对数	指数	Gamma	对数	指数	Gamma	对数	指数	Gamma	对数
H01	0.038 5	<b>0.021 0</b>	0.034 9	0.058 8	<b>0.022 1</b>	0.078 8	0.065 8	<b>0.019 1</b>	0.084 3	0.069 3	<b>0.016 2</b>	0.095 4
H02	0.033 0	<b>0.020 9</b>	0.022 0	0.057 3	<b>0.043 5</b>	0.055 2	0.057 4	<b>0.045 4</b>	0.051 1	0.064 4	<b>0.057 5</b>	0.060 5
H03	0.033 9	<b>0.015 8</b>	0.021 8	0.045 2	<b>0.024 3</b>	0.032 0	0.068 3	<b>0.041 9</b>	0.060 9	0.065 8	<b>0.044 1</b>	0.049 4
H04	0.021 5	<b>0.005 1</b>	0.015 5	0.053 0	<b>0.008 9</b>	0.035 0	0.067 5	<b>0.010 1</b>	0.045 7	0.073 2	<b>0.016 5</b>	0.045 9
H05	0.024 8	<b>0.013 9</b>	0.012 7	0.062 1	<b>0.025 6</b>	0.037 4	0.059 1	0.022 5	<b>0.020 7</b>	0.076 7	0.0274	<b>0.024 5</b>
H06	0.051 0	0.029 4	<b>0.017 3</b>	0.063 2	<b>0.027 7</b>	0.038 9	0.082 3	<b>0.044 1</b>	0.052 7	0.097 4	<b>0.075 6</b>	0.087 7
H07	0.023 4	<b>0.009 5</b>	0.015 2	0.072 0	<b>0.041 0</b>	0.050 5	0.084 5	<b>0.032 8</b>	0.054 3	0.103 2	<b>0.031 6</b>	0.066 0
H08	0.037 3	0.020 8	<b>0.018 9</b>	0.069 9	<b>0.027 2</b>	0.053 9	0.065 6	<b>0.012 7</b>	0.038 7	0.083 1	<b>0.024 3</b>	0.052 8
均值	0.033	<b>0.017</b>	0.020	0.060	<b>0.028</b>	0.048	0.069	<b>0.029</b>	0.051	0.081	<b>0.037</b>	0.060

注:加粗数字表示三个分布函数中最小 RMSE 值。

本文使用 Nash-Sutcliffe 效率(NSE)和均方根误差(RMSE)来评价模型的性能。NSE 是一个归一化指标,其值越接近于 1 表明模拟效果越好。图 3 给出了 8 个站点不同时间尺度下 FDC 模拟效果的 NSE 值和 RMSE 值箱线图,从箱线图可以直观看出这三种分布的模拟效果。对于绝大多数站点,Gamma 函数具有 NSE 高、RMSE 低的特征,其不同时间尺度下 NSE 和 RMSE 的中位数值都分别在 0.85 以上和 0.04 以下。根据以往研究成果<sup>[16]</sup>,

### 3.2 分布函数的优选

利用 8 个站点的日径流数据,从表 2 所列的 3 个分布函数中筛选出研究区域的最佳分布函数。表 3、表 4 分别给出了研究区域内各站在不同时间尺度下(1 d、7 d、15 d 和 30 d)的经验 FDC 的 NSE 和 RMSE 值。

可判定 Gamma 函数的性能最好,其次是对数正态分布函数,最差的是指数分布函数。综上所述,在分布函数选取的过程中,推荐使用 Gamma 分布函数作为拟合日径流的概率分布。

武山站和秦安站是渭河流域支流控制面积最大的两个站,代表性较强。限于篇幅,本文选取武山站和秦安站作为典型站点,将 1 d 流量历时曲线拟合值与实测值进行对比分析。结果如图 4、图 5 所示,可以看出:

1) 利用 Gamma 分布拟合的 FDC 与实测的 FDC 比较吻合;

2) 由图 6 可得, 利用 Gamma 分布拟合的 FDC, 除了枯水部分的模拟值与实测值差异较大外, 其它模拟值均在实测值的 30% 相对误差区间内, 符合精度要求。

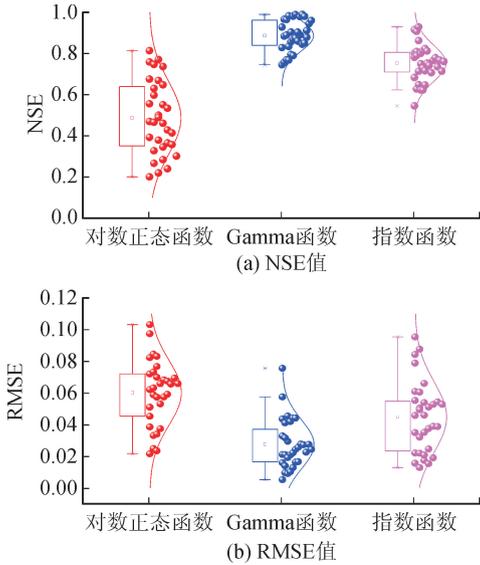


图 3 对数正态函数、Gamma 函数及指数函数模拟 FDC 的 NSE 值和 RMSE 值箱线图  
Fig. 3 Lognormal function, Gamma function and exponential function to simulate the NSE value and RMSE value box plot of FDC

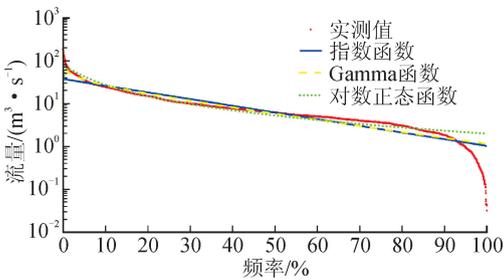


图 4 武山站实测和拟合流量历时曲线  
Fig. 4 Measurement and fitting flow diachronic curve of Wushan Station

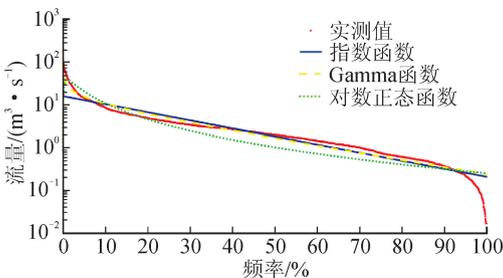


图 5 秦安站实测和拟合流量历时曲线  
Fig. 5 Measurement and fitting flow diachronic curve of Qinan Station

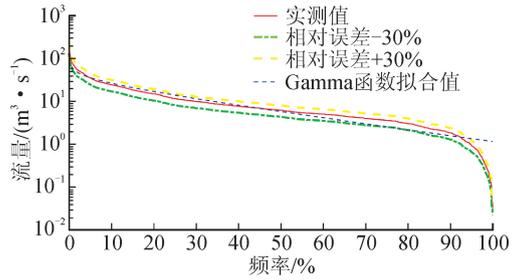


图 6 武山站实测与 Gamma 分布拟合的流量历时曲线  
Fig. 6 Flow duration curve fitted with measured and Gamma distribution at Wushan Station

### 3.3 基于 M-FDC-P 方法的 FDC 关系研究

对日径流序列在不同时间尺度上取平均值, 拟合 Gamma 分布, 并研究了 Gamma 分布参数之间的关系。如前所述, 1~30 d 时间尺度下的经验 FDC 非常相似, 可能具有很强的相关性, 因此, 本文将研究集中在 1~30 d 时间尺度上, 且大时间尺度的流量数据更容易获取。

为了评估 Gamma 分布参数随时间尺度的变化, 图 7 给出了 1~30 d 时间尺度上 8 个水文站的 FDC 的三个 Gamma 分布参数的平均值。

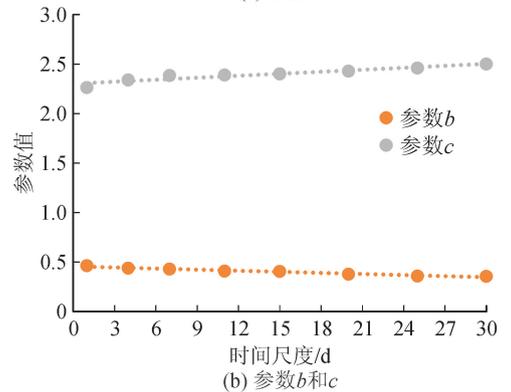
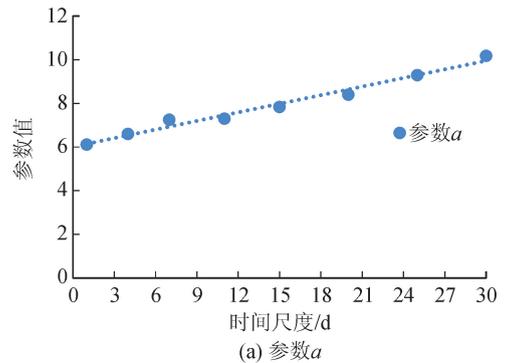


图 7 1~30 d 时间尺度下三个 Gamma 分布参数平均值的变化

Fig. 7 Change of the average value of the three Gamma distribution parameters in the time scale of 1~30 d

由图 7 可看出, 所有参数都随着时间尺度逐渐

变化,呈现出明显的变化趋势。对于参数  $b$ ,它随时间尺度增加而减少,在 1 d 时间尺度上最大为 0.46,在 30 d 时间尺度上最小为 0.35。参数  $a$  和  $c$  非常相似,均随着时间尺度的增加而增加,但参数  $a$  的增加趋势更为明显。

研究不同时间尺度下 Gamma 分布参数的相关性。表 5 给出了 1 d、7 d、15 d 和 30 d 时间尺度下三个参数之间的线性相关系数。

对于参数  $c$ ,所有相关系数均超过 0.64,表明参数  $c$  在 1~30 d 时间尺度内存在较高的相关性。对

于参数  $a$  和  $b$ ,随着时间尺度的增大,1 d FDC 与其他时间尺度之间的线性相关系数逐渐减小。与参数  $c$  相比,不同时间尺度下参数  $a$  的相关性较弱。

从参数  $a$  和参数  $b$  来看,在 1~30 d 时间尺度之间其线性相关系数显著低于参数  $c$ ,其中 1 d 与 30 d 的相关系数分别为 0.297 9 和 0.479 8,均低于 0.5,说明相关性较弱。

所有参数中,参数  $c$  线性相关系数最高,其最低时(1 d 到 30 d 时间尺度之间)仍然超过 0.6,显示出较强的相关性。

表 5 三种 Gamma 分布参数在不同时间尺度上的线性相关系数

Tab. 5 Linear correlation coefficients between three Gamma distribution parameters in different time scales

时间尺度	$a$				$b$				$c$			
	1 d	7 d	15 d	30 d	1 d	7 d	15 d	30 d	1 d	7 d	15 d	30 d
1 d	1	0.912 0	0.732 3	0.297 9	1	0.895 4	0.731 2	0.479 8	1	0.826 9	0.927 7	0.641 0
7 d	0.912 0	1	0.925 4	0.510 5	0.895 4	1	0.943 0	0.746 2	0.826 9	1	0.967 8	0.941 7
15 d	0.732 3	0.925 4	1	0.757 8	0.731 2	0.943 0	1	0.894 0	0.927 7	0.967 8	1	0.874 8
30 d	0.297 9	0.510 5	0.757 8	1	0.479 8	0.746 2	0.894 0	1	0.641 0	0.941 7	0.874 8	1

## 4 结论与展望

本文以渭河流域 8 个水文站为研究对象,运用 M-FDC-P 方法,对研究区域 8 个站点不同时间尺度上的 FDC 进行研究。

1) 不同时间尺度下,经验 FDC 随时间尺度的增加而逐渐平坦,当时间尺度在 1~30 d 时,经验 FDC 非常相似;当时间范围大于 90 d 时,FDC 会出现明显的差异。当利用单一概率分布拟合 1~30 d 时间尺度的 FDC 时,其在非洪水和非枯水部分的拟合效果较好,总体上能得到令人满意的精度,但在 FDC 的尾部模拟效果较差,这表明利用单一概率分布估计整个日径流变化过程是比较困难的,尤其是对于日径流序列尾部的变化。

2) 分布函数优选结果表明:Gamma 分布为最优分布,其次是对数正态分布函数,最差的为指数分布函数。对于绝大多数站点,Gamma 函数均具有 NSE 高、RMSE 低的特征,其不同时间尺度下 NSE 和 RMSE 的中位数值都分别在 0.85 以上和 0.04 以下。因此,以 NSE 和 RMSE 作为判据,选取 NSE 值最大、RMSE 值最小的概率分布作为最优分布,故本文推荐使用 Gamma 分布函数作为拟合日径流的概率分布。

3) 通过分析 1~30 d 时间尺度下 3 个 Gamma 分布参数的相关关系,发现不同时间尺度参数之间的线性相关系数随着时间尺度的增大而减小。其中

参数  $c$  的相关性最好,除 1 d 与 30 d 最大时间尺度差异下参数  $c$  的相关系数为 0.641 外,其他相关系数均高于 0.8;而对于参数  $a$  和  $b$ ,其 1 d 与 30 d 的相关系数分别为 0.297 9 和 0.479 8,均低于 0.5,说明相关性较弱。

上述分析研究表明,当利用一个特定的概率分布对较大时间尺度 FDC 进行建模时,可以考虑通过流量分布的内在关系得到日径流分布。本文中发现的关系可作为区域回归模型的重要补充,用于估计无资料地区的日径流过程,为今后研究区域内供水工程的规划及水资源优化配置提供设计依据。

但是,水文过程是一个具有物理机制的自然过程,本文只利用特定的概率分布来对 FDC 进行建模,无法得到准确的模拟日径流过程的概率分布,因此,在今后的研究中,可以考虑加入具有物理意义的水文模型来进行模拟,未来的研究还将考虑分布参数的区域化,以便综合利用 7 d、15 d、月流量数据和其他信息来推演完整的日径流过程。

### 参考文献:

- [1] SIVAPALAN M, TAKEUCHI K, FRANKS S W, et al. IAHS decade on predictions in ungauged basins (PUB), 2003-2012: shaping an exciting future for the hydrological sciences [J]. Hydrological Sciences Journal, 2003, 48(6): 857-880.
- [2] 詹道江,叶守泽. 工程水文学[M]. 第三版. 北京:中国水利水电出版社, 2000.

- [3] 黄国如,姚锡良. 区域流量历时曲线构建及其不确定性分析[J]. 水力发电学报, 2011, 30(4): 14-19,29.  
HUANG Guoru, YAO Xiliang. Generation and uncertainty analysis of regional flow duration curves [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30 (4): 14-19, 29.
- [4] HOPE A, BART R. Synthetic monthly flow duration curves for the Cape Floristic region, south Africa[J]. Water SA, 2012, 38(2):191-200.
- [5] SHU C, OUARDA T B M J. Improved methods for daily streamflow estimates at ungauged sites[J]. Water Resources Research, 2012, 48(2): W02523.
- [6] PUGLIESE A, FARMER W H, CASTELLARIN A, et al. Regional flow duration curves: geostatistical techniques versus multivariate regression[J]. Advances in Water Resources, 2016, 96:11-22.
- [7] 许文涛. 考虑日径流特征的非一致性洪水频率分析方法研究[D]. 武汉:武汉大学, 2019.  
XU Wentao. Nonstationary flood frequency analysis based on annual daily flow series [D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.
- [8] CASTELLARIN A, CAMORANI G, BRATH A. Predicting annual and long-term flow-duration curves in ungauged basins[J]. Advances in Water Resources, 2007, 30(4):937-953.
- [9] BLÖSCHL G, SIVAPALAN M, WAGENER T, et al. Runoff prediction in ungauged basins: synthesis across processes, places and scales [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [10] 杨邦, 任立良, 陈福容, 等. 无资料地区水文预报(PUB)不确定性研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(4): 7-10.  
YANG Bang, REN Liliang, CHEN Furong, et al. Uncertainty research of hydrological prediction in ungauged basis [J]. Water Resources and Power, 2009, 27 (4): 7-10.
- [11] 黄国如. 利用区域流量历时曲线模拟东江流域无资料地区的日径流过程[J]. 水力发电学报, 2007, 26(4): 29-35.  
HUANG Guoru. Daily flow hydrograph simulation using regional flow duration curves for ungauged region of Dongjiang basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26 (4): 29-35.
- [12] YE L, DING W, ZENG X F, et al. Inherent relationship between flow duration curves at different time scales: a perspective on monthly flow data utilization in daily flow duration curve estimation[J]. Water, 2018, 10(8): 1008.
- [13] 水利部黄河水利委员会. 中华人民共和国水文年鉴(第4卷):2001-2016 [M]. 郑州:水利部黄河水利委员会, 2002-2017.
- [14] ARCHFIELD S A, VOGEL R M. Map correlation method: Selection of a reference streamgage to estimate daily streamflow at ungauged catchments[J]. Water Resources Research, 2010, 46: W10513.
- [15] FENNESSEY N, VOGEL R M. Regional flow-duration curves for ungauged sites in Massachusetts [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1990, 116(4): 530-549.
- [16] ZHANG D, LIN J Q, PENG Q D, et al. Modeling and simulating of reservoir operation using the artificial neural network, support vector regression, deep learning algorithm[J]. Journal of Hydrology, 2018, 565: 720-736.

(责任编辑 周蓓,卢秀)