

# 基于年最大抽样序列的暴雨频率估计值的修正研究

邵月红<sup>1</sup>, 刘玲<sup>1</sup>, 吴俊梅<sup>2</sup>, 刘永和<sup>3</sup>

(1. 南京信息工程大学水文气象学院, 江苏 南京 210044; 2. 昆山气象局, 江苏 昆山 215300;  
3. 河南理工大学资源与环境学院, 河南 焦作 454000)

**摘要:**以江苏省为研究区,利用地区线性矩法和周文德频率转换关系式对年最大抽样序列估算的频率估计值进行修正,推求合理可靠的频率估计值。研究结果表明:基于气象成因和水文统计特性相结合的方法将研究区划分为5个水文气象一致区。通过蒙特卡罗模拟、均方根误差判断各一致区的最优分布;年最大抽样序列的最优分布以GEV为主,年超大抽样序列的最优分布以GPA为主。基于两个实测序列计算的频率估计值比值和基于年最大抽样与周文德转换后的年超大抽样计算的估计值比值进行比较,研究表明:周文德频率转换关系式适用于该研究区。在此基础上,对年最大抽样序列估计的频率估计值进行修正。站点的频率估计值分布特征表现为:随着重现期的增加而增加,不同重现期下的暴雨频率估计值空间分布趋势基本一致,从南向北渐增,暴雨中心分布在苏北的宿迁和连云港一带;站点的频率估计值与同频率的观测值吻合较好,相对误差较小、相关性很高。基于年最大抽样序列和周文德公式频率转换能够推求计算合理可靠的暴雨频率估计值。

**关键词:**地区线性矩法;年最大抽样序列;年超大抽样序列;频率估计值

中图分类号:P333 文献标识码:A 文章编号:1000-0852(2019)01-0007-08

我国是洪涝灾害频发的国家,防洪是一个事关生命财产安全和社会安定的大课题<sup>[1]</sup>。防洪设计标准估算的一个重要依据是洪水频率计算成果,其理论基础是水文频率计算。随着国民经济的快速发展及环保意识的增强,25年一遇以下的常遇频率事件越来越被重视和关注,特别是城市化的快速推进导致的城市内涝日益严峻,促使人们重视常遇频率下的水文气象事件的频率分析计算。抽样方法对常遇频率的估计值有较大的影响。

目前国际上常用的抽样方法有年最大抽样(Annual Maximum Series, AMS)、年多次抽样(Partial Duration Series, PDS)和年超大值抽样(Annual Exceedance Series, AES)三种。AMS序列由每年的最大值组成,它包含了暴雨洪峰径流的重要信息,概念清楚,选取方法简单操作,样本数据之间相对独立,在水文频率分析中得到广泛应用<sup>[2-5]</sup>。但是这种方法每年只

抽取一个最大值,会遗漏一些数值较大、在年内排第二、三的次大值,使常遇频率估计值偏低。同时,AMS选择的“每年中的最大事件”与重现期“统计平均”的概念不一致也会造成计算结果与实际不符。国内外一些学者的研究表明:采用AMS资料会与实际情况产生偏差,引起估算的暴雨频率设计偏小<sup>[1,6-7]</sup>。PDS序列是选取全部资料 $N$ 年中超过某一预先设定阈值的所有资料,资料序列前面最大 $N$ 组观测值就是AES序列,即AES可以看做PDS的一个特例。从理论基础看,PDS序列与我国的超定量理论本质上一致的,能够更大限度的利用降雨和洪水信息量,与重现期的概念相一致,对厚尾的分布线性具有良好的统计性能。因此,PDS序列具有较好的物理概念和应用潜力。许多学者做了大量的研究,结果表明:基于PDS序列估算的频率设计值取得了较好的效果,且精度的高低与样本的独立性和阈值的大小有密切的关系<sup>[8-11]</sup>。但是

收稿日期:2017-10-23

基金项目:江苏省青年基金项目(BK20141001);淮河流域气象中心开放项目暨安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室开放基金项目(HRM201702)

作者简介:邵月红(1977-),女,山西侯马人,副教授,博士,主要从事水文气象统计、GIS在水文气象上的应用。E-mail: syh@nuist.edu.cn

PDS 存在两个主要问题:首先需要花很多的时间和精力来验证样本的独立性,使得序列构造较困难;其次,PDS 抽样的次频率不符合以年为单位的重现期的概念,使得次频率与年频率的转换及验证困难。如何解决上述存在的问题? AES 作为 PDS 的特例,符合以年为单位的重现期,不需要经过年频率与次频率的转换,可以简化选样和统计,能得出与 PDS 序列相近的结果<sup>[12]</sup>。并且周文德在 1964 年提出了 AMS 和 AES 的频率转换关系式,在国外被普遍接受并被用于工程实践的频率转换<sup>[13,14]</sup>。基于以上原因,本文以江苏省为研究区,选取 AMS 和 AES 两种抽样序列,采用地区线性矩法推求站点的暴雨频率估计值,验证周文德频率转换式在该区的适用性;在此基础上,对基于 AMS 序列计算的频率估计值进行修正。

## 1 研究区概况及资料处理

江苏(116°18′~121°57′E, 30°45′~35°20′N)位于我国东部沿海,地处长江、淮河下游,东滨黄海,北接山东,西连安徽,东南与上海、浙江接壤;内陆面积 10.72×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>,是长江三角洲地区重要组成部分。地形以平原为主,地形大势呈南北高、中间低,并自西向东倾斜。研究区河网水系稠密,处于亚热带向暖温带过渡的气候带,多年平均降水量 996mm,其中长江流域片多年平均降水量 1 050mm,淮河流域片多年平均降水量 964mm。暴雨多出现在 6~9 月,尤其集中在 7~8 月。空间分布为沿海多于内陆,苏北多于苏南,特别是位于沂蒙山南麓的沂南、沂北地区是暴雨多发地带。研究区的地形、水系和站点空间分布见图 1。

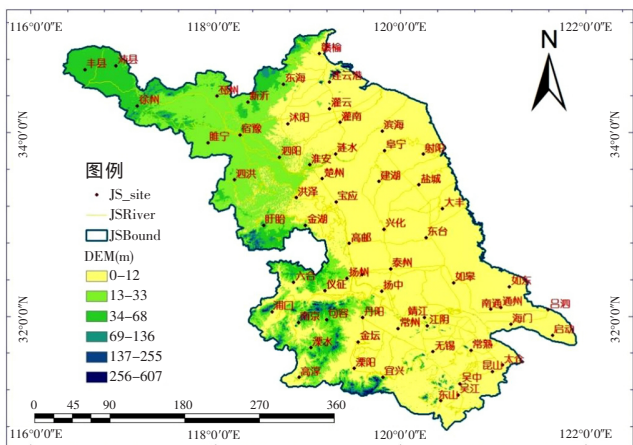


图 1 研究区站点、水系和高程空间分布图

Fig.1 The spatial distribution of meteorological stations, streamline and elevation in Jiangsu Province

本文降雨数据资料来自中国气象科学数据共享服务网提供的中国地面气象资料日值数据集(<http://cdc.cma.gov.cn/shuju>)。从数据集中选取江苏 63 个常规气象站点的 1961~2011 年的逐日降雨量,序列长度 51a。然后从逐日降雨量中提取出各站点年最大日降雨量,组成序列 AMS;从逐日降雨量中提取每个站点的年最大 3 个降雨量值组成年多次抽样,即 PDS;将 PDS 序列从大到小排序,截取序列的最大  $X$  个降雨量值( $X$ =该站的实测资料年数),组成 AES;AES 为 PDS 的一个特例。

## 2 研究方法介绍

### 2.1 地区线性矩分析法简介

线性矩的无偏性和对特大值的稳健性等优点在水文频率参数估计中得到广泛应用<sup>[15]</sup>。地区分析法利用周边站点信息来降低单站点估计的误差和不确定性。因此,利用地区线性矩法可以推求合理可靠的降雨频率估计值。

地区频率分析法是运用某一地区的所有雨量站的历史资料系列来分析本区内每一个雨量站各自的雨量频率分布曲线,进而推求各个站点的雨量频率估计值。某一地区的前提必须是水文气象一致区。一致区内某一站点的频率估计值应该是反映地区的频率估计值分量与反映本地特有的降雨特性的本地分量的“叠加”作用的产物,借助地区分析法这一工具来提高各站点频率估计值的稳定可靠性。用下面的公式简单表示:

$$Q_{T,ij} = q_{Ti} \times \bar{x}_{ij} \quad (1)$$

式中: $T$  为重现期; $i$  为一致区; $j$  为站点; $Q_{T,ij}$  为第  $i$  个一致区内第  $j$  个站点的重现期  $T$  下的降雨频率估计值; $\bar{x}_{ij}$  为反映本站点特有的降雨特性分量,一般用站点降雨量的多年平均值表示; $q_{Ti}$  为反映该地区共有的降雨特性的地区频率因子,为无量纲频率分布因子。对于选择的某一分布,以各站点的序列长度为权重进行加权平均一系列区域参数。以区域线性离差系数为例说明,可表示为:

$$\hat{L}_{G^i}^{(R)} = \sum_i n_i \hat{L}_{G^i}^{(i)} / \sum_i n_i, \quad i=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式中: $\hat{L}_{G^i}^{(R)}$  和  $\hat{L}_{G^i}^{(i)}$  分别为区域离差系数和站点  $i$  的离差系数。

### 2.2 抽样方法及频率转换简介

AMS 序列会造成常遇频率估计值的低估。从理论基础看,PDS(AES)序列具有更好的物理概念和成因

内涵,符合重现期的定义。但是 PDS 序列构造困难,同时次频率与年频率的转换及验证困难。周文德教授在 1964 年从数学上推导出 AMS 和 AES 重现期之间的换算关系,通过两种抽样方法之间的频率转换,可用于解决上述存在的问题<sup>[13]</sup>。具体公式为:

$$T_{AES} = \left[ \ln \left( \frac{T_{AMS}}{T_{AMS} - 1} \right) \right]^{-1} \quad \text{或者} \quad T_{AMS} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{1}{T_{AES}}}} \quad (3)$$

式中: $T_{AES}$  和  $T_{AMS}$  分别代表年 AES 和 AMS 的重现期。

根据公式(3)进行频率转换的关系见表 1。

表1 AMS和AES的频率转换关系式  
Table1 The relationship of return periods based on AMS and AES data

$T_{AES}/\text{year}$	$T_{AMS}/\text{year}$	$P=1/T_{AMS}$	$P_{MON}=1-1/T_{AMS}$
1	1.58	0.6321	0.3679*
2	2.54	0.3935	0.6065
5	5.52	0.1813	0.8187
10	10.51	0.0952	0.9048
25	25.50	0.0392	0.9608
50	50.50	0.0198	0.9802
100	100.50	0.0099	0.9901

### 3 结果与讨论

3.1 水文气象一致区的划分及最优分布的选择结果分析  
一致区的划分对降雨频率估计值的计算非常重要。水文气象一致区划分是基于气象成因和水文统计特性相结合的方法。主要通过气象相似性、水文相似性、样本独立性和不和谐检验四步来进行一致区的判定和划分,详细的步骤可参考相关文献<sup>[16]</sup>。根据上述步骤基于 AMS 数据将研究区划分为 5 个一致区,结果如图 2 所示。

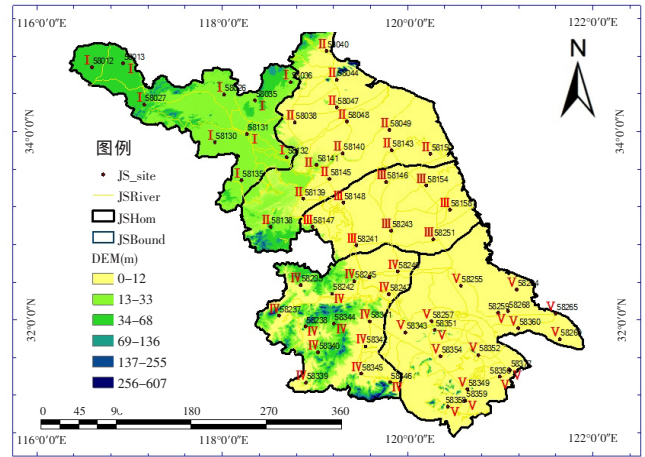


图 2 基于 AMS 序列划分的水文气象一致区  
Fig.2 The five hydro-meteorological homogeneous regions distribution based on AMS data

在分区的基础上,为每个水文气象一致区选择最优的频率分布曲线。为了确保结果的合理性,本文通过蒙特卡洛 (Monte Carlo, MC) 模拟和均方根误差 (Root mean square error, RMSE) 检验两种拟合优度来确定最优的分布曲线,拟合优度的检测方法具体步骤可参考相关文献<sup>[16]</sup>。由于三参数的分布线型兼具相对的稳定性和灵活性,常被用来模拟极值降雨的分布。本文选择 5 种常用的三参数分布曲线作为候选分布: GLO、GEV、GNO、GPA 和 PE3 分布。表 2 给出了基于 AMS 数据的 MC 和 RMSE 检测结果。基于拟合优度的检测结果分析,AMS 数据的 5 个一致区的最优分布分别为:GLO、GEV、GLO、GEV 和 GEV。同理,基于 AES 数据的 5 个一致区的最优分布分别为:GNO、GPA、GPA、GPA 和 GPA。从各个一致区的最优分布线型可以看出:基于 AMS 抽样序列的最优分布以 GEV 为主,基于 AES 抽样序列的最优分布以 GPA 为主。

表2 各一致区内MC和RMSE检测结果(AMS)  
Table2 The results of MC and RMSE based on AMS data

检测指数	分布	水文气象一致区				
		1 区	2 区	3 区	4 区	5 区
Z	GLO	-0.17	2.63	-0.28	2.00	2.47
	GEV	-1.39	0.26	-1.66	0.05	0.37
	GNO	-2.05	-0.25	-2.05	-0.78	-0.56
	GPA	-4.46	-5.11	-4.87	-4.71	-4.79
	PE3	-3.21	-1.35	-2.83	-2.27	-2.24
$Z_{min}$ 的分布		GLO	GNO	GLO	GEV	GEV
RMSE	GLO	0.0404	0.0650	0.0401	0.0591	0.0655
	GEV	0.0424	0.0445	0.0509	0.0395	0.0447
	GNO	0.0834	0.0466	0.0604	0.0452	0.0470
	GPA	0.0555	0.0885	0.1239	0.0811	0.0773
	PE3	0.1057	0.0546	0.0797	0.0632	0.0628
$RMSE_{min}$ 的分布		GLO	GEV	GLO	GEV	GEV



### 3.2 周文德公式在研究区的适用性验证结果分析

周文德公式(Chow式)是国外一直以来普遍接受且被用于工程实践的频率转换关系式。如果Chow式适用于本研究区,即可用于资料缺乏(只有AMS资料)地区,对基于AMS计算的频率估计值进行修正。验证如下:第一,基于AMS和AES资料进行水文频率计算,得到各自最优分布线型下的暴雨频率设计值,计算两者的比值,得到不同重现期下的Best-Data序列;第二,只基于AMS数据资料推求频率设计值。首先基于AMS序列计算频率设计值;然后,借助Chow式和AMS序列推导出AES序列,计算其频率设计值;最后,计算两者的比值。这里分两种情况:采用每个区的最优分布线型,得到不同重现期下的Best-Chow序列;所有的一致区都采用同一种固定分布,比如GEV、GNO等,得到不同重现期下的Gev-Chow和Gno-Chow序列。计算结果如图3所示。

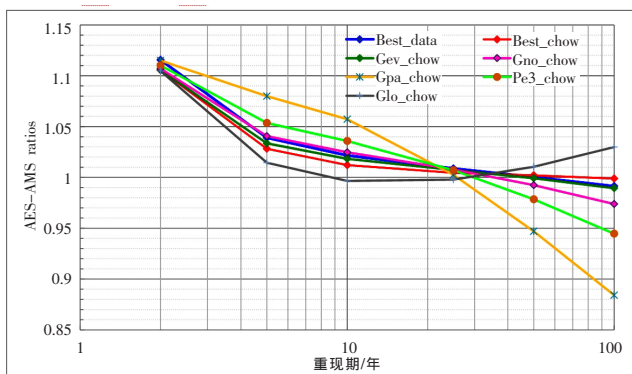


图3 AES和AMS序列下的频率估计值比值的比较  
Fig.3 The comparison of AES-AMS ratios between Chow's equation and real data

图3给出了实测数据的AES-AMS序列和利用周文德公式换算的AES-AMS频率设计值的比值图。由于两种抽样方法对频率估计值的影响主要体现在常遇频率中,因此,本文只分析和比较重现期小于百年一遇的频率估计值的比值。由图可知:除了Glo-Chow序列,各序列比值的趋势基本一致,以25年一遇为分界点,当重现期小于25年一遇的常遇频率范围内,比值是大于1,并随着重现期的增加而逐渐减小并趋近于1;当重现期大于25年一遇,比值小于1,并随着重现期的增加而逐渐减小。当重现期超过分界点时,影响频率估计值的主要因素为分布线型,由于Glo分布的尾端在5种分布中厚重程度最大,在同一重现期下估计的频率估计值最大,从而造成Glo-Chow序列曲

线上翘。五种分布的周文德序列和Best-Chow序列中, Best-Chow、Gev-Chow、Gno-Chow都与Best\_data模拟结果相一致,其中Gev-Chow和Best\_data吻合的最好。当重现期大于25年一遇时,随着重现期的增加,不同分布的Chow序列和Best\_data序列的偏差越来越大,特别是Gpa-Chow曲线随着重现期的增加下降的幅度最大。主要原因可能为:不同序列下各个一致区内的最优分布不同,5种分布(GLO、GEV、GNO、GPA和PE3)的尾部厚薄及其本身的分布线型差异较大,进而推求的频率估计值差异随着重现期的增加而增加。综合来看, Best-Chow、Gev-Chow和Best\_data吻合较好,即基于这两种序列的周文德超定量抽样公式适用于该研究区,可以通过Chow式转换生成AES序列替代AES实测数据序列,修正AMS抽样序列计算的频率估计值。

### 3.3 基于年最大抽样估计的频率值修正分析

本文在验证周文德超定量抽样公式适用于该研究区的基础上,基于AMS序列和周文德公式频率转换(见表1)来推求计算合理可靠的暴雨频率估计值。根据地区共有的地区频率因子和本地的降雨特性进行叠加可以求出任一站点不同重现期下的频率估计值。由于篇幅有限,本文以第I一致区为例,给出不同重现期的频率估计值,结果见表3。由表可知:频率估计值的总体趋势是随着重现期的增加而增加。以I区的最大频率估计值对应的站点宿豫来看,50年一遇的频率估计值为255.5mm,宿豫站实际观测的51年的AMP序列中,最大观测值为253.9mm,频率估计值和实际观测值吻合较好。这里需要特别说明的是:基于AMS和Chow式频率转换可以推求出合理的频率分布密度函数积分下限(一年一遇)对应的频率估计值。如果只是基于AMS序列,根据公式 $P_{NON}=1-1/T_{AMS}$ ,若重现期 $T_{AMS}=1$ , $P_{NON}=0$ ,频率估计值无法计算。但是根据表1的Chow式转换,可知一年一遇下的不超过概率为 $P_{NON}=0.3679$ ,相当于AMS抽样下1.58年一遇的重现期,从而推求出合理的一年一遇的频率估计值。由表3可知I区的一年一遇的频率估计值范围为73.3~90.1mm。

以1年、10年、25年和50年一遇四个重现期为例,图4给出了各重现期下的频率估计值的空间分布。由图可知:四个重现期下的暴雨频率估计值的大致范围为70~95mm、135~170mm、165~205mm和190~245mm。不同重现期下的暴雨频率估计值空间分布趋

表3 研究区第I一致区内站点极值降雨频率估计值  
Table3 The quantile estimates for different return periods in homogeneous region I

站点	极值降雨频率估计值(1d)									
	1y	2y	5y	10y	25y	50y	100y	200y	500y	1000y
丰县	73.3	91.0	116.6	139.1	174.9	207.9	246.9	294.2	371.2	443.0
沛县	80.1	99.4	127.4	152.0	191.1	227.2	269.8	321.4	405.6	484.0
邳州	85.4	106.0	135.9	162.1	203.8	242.2	287.6	342.7	432.3	516.0
徐州	83.7	103.9	133.2	158.8	199.7	237.3	281.9	335.8	423.8	505.7
新沂	78.0	96.8	124.1	148.0	186.1	221.2	262.7	313.0	394.9	471.3
东海	79.7	99.0	126.9	151.4	190.3	226.2	268.6	320.0	403.8	481.9
睢宁	90.0	111.7	143.2	170.8	214.7	255.2	303.1	361.1	455.6	543.8
宿豫	90.1	111.9	143.4	171.0	215.0	255.5	303.5	361.6	456.2	544.5
泗阳	85.0	105.6	135.3	161.4	202.9	241.1	286.4	341.2	430.5	513.8
泗洪	80.5	100.0	128.2	152.9	192.2	228.5	271.4	323.3	407.9	486.8

势基本一致,特别是1年一遇和10年,25年和50年一遇两两重现期下的空间分布非常相似,总的来说南部估计值低、北部高;从不同重现期下的空间分布图上看,高值主要分布在苏北的徐州、宿迁和连云港一带,低值分布在苏南的太湖流域周围和苏中的高邮、兴化附近。由暴雨频率估计值的空间分布可知:徐州宿迁和

连云港为暴雨高风险区,比较容易产生由暴雨引发的洪涝灾害,这与站点的实际观测相一致,在徐州市的沛县和睢宁县实际观测到340.5mm的大暴雨,在徐州和邳州观测到315mm的大暴雨。这一结果可以作为该区域洪涝灾害早期预警规划的科学基础,为其提供理论依据。

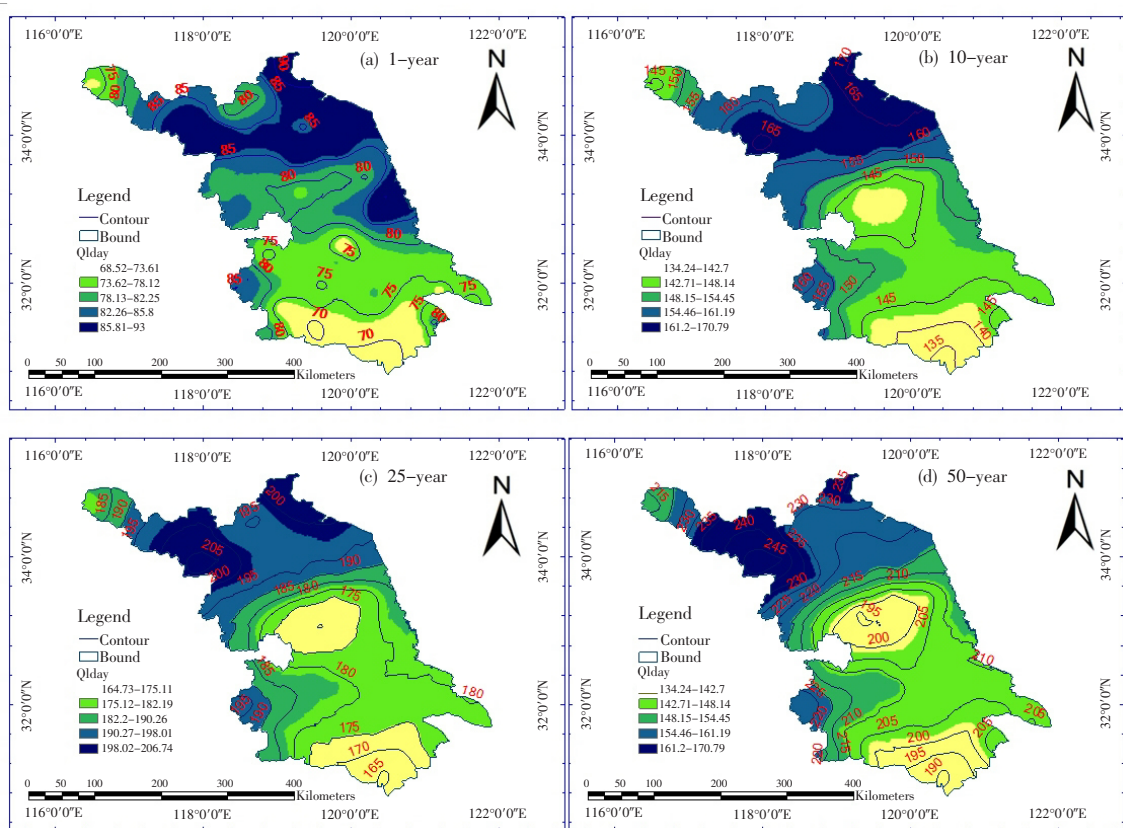


图4 不同重现期下的暴雨频率估计值的空间分布图  
Fig.4 The spatial distribution of quantile estimates for different return periods

表4 研究区站点AMP序列的实测最大值与频率估计值(50-y)的比较(I和V区)

Table4 The comparison between the estimation of 50-year return period and maximum observation (I and V regions)

站点	Obs(mean)	Obs(max)	Est-50y	RE/%	站点	Obs(mean)	Obs(max)	Est-50y	RE/%
丰县	91.2	267.9	207.4	22.6	吕泗	98.0	202.7	213.5	5.3
沛县	99.7	340.7	226.6	33.5	通州	95.9	198.0	208.9	5.5
邳州	106.2	310.2	241.5	22.1	启动	92.4	195.0	201.2	3.2
徐州	104.1	315.4	236.7	24.9	常州	93.8	196.2	204.3	4.1
新沂	97.0	265.7	220.6	17.0	吴中	87.9	343.1	191.3	44.2
东海	99.2	204.5	225.6	10.3	江阴	98.7	221.6	215.0	3.0
睢宁	112.0	340.9	254.5	25.3	常熟	89.8	298.0	195.6	34.3
宿豫	112.1	253.9	254.9	0.4	无锡	94.2	202.9	205.1	1.1
泗阳	105.8	219.3	240.5	9.7	昆山	92.4	204.9	201.2	1.8
泗洪	100.2	244.4	227.9	6.8	东山	85.3	208.3	185.7	10.8
如皋	96.1	196.8	209.2	6.3	吴江	86.7	333.5	188.8	43.4
靖江	93.7	219.4	204.2	7.0	海门	90.5	170.7	197.1	15.5
南通	93.1	194.0	202.7	4.5	太仓	100.8	226.5	219.6	3.1
如东	96.6	236.8	210.3	11.2					

注:Obs(mean)为AMP序列的平均值,Obs(max)为序列的最大观测值,Est-50y为50年一遇的频率估计值。

由于频率估计值的真值未知,无法通过估计值和真值的误差来评价估计值的精度。但可以间接反映估计值的准确度。本文采用两种方法进行验证估计值的精度。第一种是粗略估计。考虑到站点序列长度为51年,将观测序列的最大值与50年一遇的频率估计值进行比较,计算相对误差(Relative Error, RE)进行评估。以研究区的I区和V区为例,表4给出了AMP序列的观测值与估计值的结果。由表可知:频率估计值和AMP序列的最大观测值基本吻合,平均相对误差为13.8%。但是当序列的最大观测值大于等于3倍的均值时,相对误差较大,且倍数越大,RE越大。即特大暴雨会对频率估计值产生较大影响,这种情况下就不能较好反映频率估计值的准确度。

第二种方法是比较同频率下的实测值与频率估计值来间接反映估计值的准确度。基于各站点的AMP序列,采用绘点公式计算其经验频率,具体公式为:

$$P=(i+A)/(n+B) \quad (4)$$

式中: $i$ 为各站点从小到大排列的序号; $n$ 为各站点的序列长度; $A$ 和 $B$ 为绘点参数,这里采用 $A=-0.35$ , $B=0$ 。

基于上述绘点公式计算每个站点的AMP序列所对应的的经验频率,基于各一致区的最优分布求得各站点经验频率下的频率估计值,比较同频率下的实测值与频率估计值。表5给出了各个一致区内的站点实测值和估计值的比较。由表可知:研究区所有站的平

均相对误差为5.56%,RMSE为0.107mm,相关系数( $r$ )为0.969。研究表明估计值和观测值的吻合很好。图5给出了研究区及所有一致区内各站点实测值与频率估计值的散点图。由图可知:各个一致区下站点的估计值和实测值总体吻合较好,相关系数都在0.96以上。但各一致区的散点图都表现出:当降雨小于

表5 各一致区内站点实测值和频率估计值的结果评价  
Table5 The comparison between the estimation and observation in each homogeneous region

一致区	RE/%	RMSE/mm	$r$
I区	5.47	0.101	0.975
II区	5.31	0.093	0.975
III区	4.77	0.09	0.971
IV区	5.88	0.118	0.965
V区	5.96	0.119	0.961
研究区	5.56	0.107	0.969

200mm时,估计值和实测值吻合非常好,当降雨大于200mm时,估计值和实测值的偏离较大,离散程度较大;当降雨在200~300mm之间时,频率估计值表现以高估为主,当降雨大于300mm时,估计值主要表现为低估,即当出现特大暴雨时,基于分区线性矩法估计的暴雨频率估计值相对于观测值略有偏低。总体来讲,基于水文气象分区线性矩法估测的研究区站点频率估计值与同频率的观测值基本吻合。



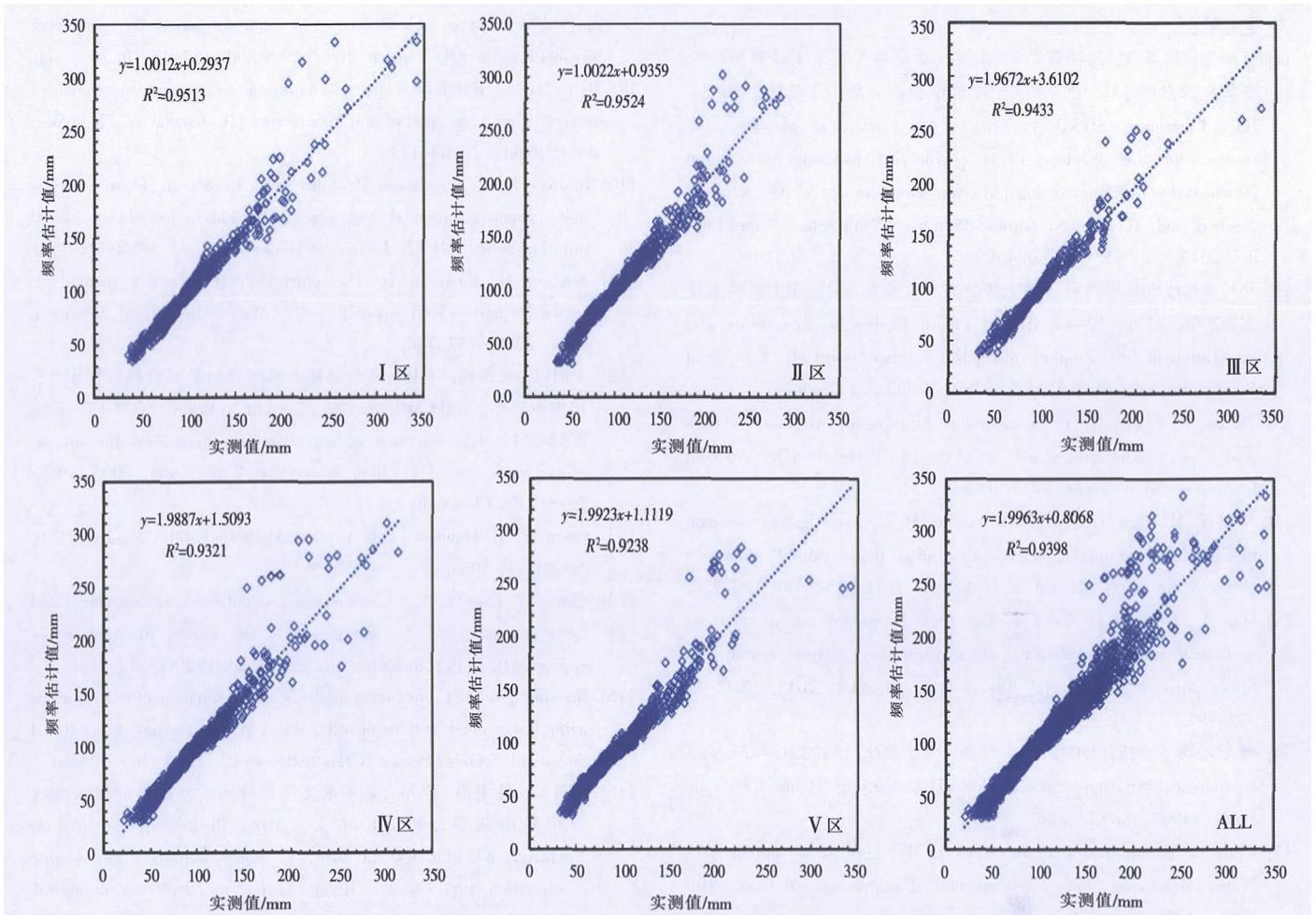


图5 研究区及所有一致区内各站点实测值与频率估计值的结果比较

Fig.5 A scatter plot of estimation and observation at the same frequency for each homogeneous region

#### 4 小结

本文利用水文气象分区线性矩法,基于 AMS 序列结合周文德频率转换式推求合理可靠的暴雨频率估计值。主要结论如下:

(1) 综合考虑气象成因和水文统计等因素,基于 AMS 数据将研究区划分为 5 个水文气象一致区。通过蒙特卡洛模拟和均方根误差两种拟合优度判断各一致区的最优分布。基于 AMS 数据的最优分布分别为: GLO、GEV、GLO、GEV 和 GEV; 基于 AES 的最优分布为: GNO、GPA、GPA、GPA 和 GPA。

(2) 采用各一致区选择各自最优分布和所有一致区采用同一种分布两种方式验证周文德公式在本研究区的适用性。结果表明:周文德频率转换关系式适用于该研究区,其中 Best\_Chow、Gev\_Chow 和 Best\_data 吻合的最好。即可以通过 Chow 式转换生成 AES 序列可以替代 AES 实测数据序列,修正 AMS 抽样序列计

算的频率估计值。

(3) 基于 AMS 序列和周文德公式频率转换来推求计算合理可靠的暴雨频率估计值。结果表明:站点的频率估计值随着重现期的增加而增加;不同重现期下的暴雨频率估计值空间分布趋势基本一致,从南向北渐增,暴雨中心分布在苏北的宿迁和连云港一带;站点的频率估计值与同频率的观测值吻合较好,平均相对误差为 5.56%,均方根误差为 0.107mm,相关系数为 0.969。但当出现特大暴雨时,估计值和观测值还是有一定的偏差。

(4) 虽然结合周文德公式对 AMS 的低估进行了修正,得到合理可靠的频率估计值。但由于获取的数据有限,只分析了单个时段的频率估计值;同时不同一致区选择的最优分布不同会造成相邻一致区的边界出现估计值梯度现象。下一步的研究将会重点讨论和研究多时段和空分布一致性的检验和纠正问题。

## 参考文献:

- [1] 林炳章, 邵月红, 闫桂霞, 等. 水文气象促进工程水文计算核心课题研究的发展 [A]. 中国水文学学术讨论会论文集 [C]. 2012, 50-63. (LIN Bingzhang, SHAO Yuehong, YAN Guixia, et al. The core research on the development of engineering hydrology calculation promoted by hydrometeorology[A]. New Development of Hydrological Science and Technology, China Hydrology Symposium Proceedings [C]. 2012, 50 - 63. (in Chinese))
- [2] 邓培德. 城市暴雨两种选样方法的概率关系与应用评述[J]. 给水排水, 2006, 32(6): 39-42. (DENG Peide. Review on probability and application of two sampling methods for urban storm [J]. Water and Wastewater Engineering, 2006, 32(6): 39-42. (in Chinese))
- [3] Neves M, Gomes D P. Geostatistics for spatial extremes: A case study of maximum annual rainfall in Portugal [J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 7: 246-251.
- [4] Kuo Y M, Chu H J, Pan T Y, Yu H L. Investigating common trends of annual maximum rainfalls during heavy rainfall events in southern Taiwan[J]. Journal of Hydrology, 2011, 409(3-4): 749-758.
- [5] Shao Y H, Wu J M, Ye J Y, Liu Y H. Frequency analysis and its spatiotemporal characteristics of precipitation extreme events in China during 1951-2010[J]. Theor. Appl. Climatol., 2015, 121(3-4): 775-787.
- [6] 刘光文. 水文分析计算[M]. 南京: 河海大学出版社, 1997.(LIU Guangwen. Hydrological Analysis and Calculation[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1997. (in Chinese))
- [7] Chow V T, Maidment D R, Mays L W. Applied Hydrology [M]. Water Resources and Environmental Engineering, McGraw -Hill Series, 1988, 380-385.
- [8] 王善序. 洪水超定量系列频率分析[J]. 人民长江, 1999, 30(8): 23-25. (WANG Shanxu. Flood frequency analysis based on peak over threshold method[J]. Yangtze River, 1999,30(8): 23-25. (in Chinese))
- [9] Ben-Zvi A. Rainfall intensity - duration - frequency relationships derived from large partial duration series [J]. Journal of Hydrology, 2009, 367(1 - 2):104-114.
- [10] Bhunya P K, Berndtsson R, Jain S K, Kumar R. Flood analysis using negative binomial and generalized Pareto models in partial duration series (PDS)[J]. Journal of Hydrology, 2013, 497(8):121-132.
- [11] Madsen H, Rosbjerg D. The partial duration series method in regional index -flood modeling [J]. Water Resources Research, 1997, 33(4): 737-746.
- [12] 任伯帆, 龙腾锐, 王利. 采用年超大值法进行暴雨资料选样[J]. 中国给水排水, 2003, 19 (5): 79-81. (REN Bozhi, LONG Tengrui, WANG Li. The selection of storm samples based on the annual exceedance series [J]. China Water and Wasterwater, 2003, 19(5): 79-81. (in Chinese))
- [13] Chow V T. Handbook of Applied Hydrology [M]. McGraw-Hill, New York, 1964.
- [14] Claps P, Laio F. Can continuous streamflow data support flood frequency analysis? An alternative to the partial duration series approach[J]. Water Resources Research, 2003, 39(8): 12-16.
- [15] Hosking J R M. L-moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics [J]. Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological), 1990: 105-124.
- [16] 邵月红, 吴俊梅, 李敏. 基于水文气象分区线性矩法的淮河流域极值降雨频率分析 [J]. 水文, 2016, 36 (6): 16-23. (SHAO Yuehong, WU Junmei, LI Min. Frequency analysis of extreme precipitation in Huaihe River based on hydrometeorological regional L-moments method[J]. Journal of China Hydrology, 2016, 36(6): 16-23. (in Chinese))

## Revision of Extreme Precipitation Frequency Estimation Based on Annual Maximum Series

SHAO Yuehong<sup>1</sup>, LIU Ling<sup>1</sup>, WU Junmei<sup>2</sup>, LIU Yonghe<sup>3</sup>

(1. College of Hydrometeorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. Kunshan Meteorological Bureau, Kunshan 215300, China;

3. Institute of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** The extreme precipitation frequency estimation based on the annual maximum series (AMS) was revised by using hydrometeorological regional L-moments method and Chow's equation for Jiangsu Province, China. Firstly, the study area was divided into five homogeneous regions by a coupled methods of hydrologic statistics and climatological factors. The optimum distribution for each region was determined by the Monte Carlo simulation and root mean square error. For AMS, Generalized Extreme Value (GEV) is the more appropriate distribution in most homogeneous regions, and Generalized Pareto distribution (GPA) is the optimum curve for annual exceedance series (AES). In the next step, the frequency estimation ratios were respectively computed by using the real AMS and AES, the real AMS and the generated AES by Chow's equation. The results show that Chow's formula is applicable for the study area. A set of rational and reliable frequency estimation can be obtained by using hydrometeorological regional L-moments method based on AMS and Chow's equation. The spatial distribution of quantiles show that the northern area are greater than the south area, and all of them increase with the increase of return period. The highest frequency estimates were observed near the Suqian and Lianyungang stations in the northern area of Jiangsu Province. The frequency estimates are in good agreement with the observed values at the same frequency, which can provide important basis for flood control and water resource management.

**Key words:** regional L-moments method; annual maximum series; annual exceedance series; frequency estimation