

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.02.002

广东省暴雨高风险区划

廖一帆¹, 林炳章², 丁 辉¹

(1. 南京信息工程大学大气科学学院, 江苏 南京 210044;
2. 南京信息工程大学应用水文气象研究院, 江苏 南京 210044)

摘要:运用水文气象地区线性矩频率分析法,选取广东省及周围缓冲区雨量站 1 h、6 h、12 h 和 24 h 年最大降水量资料,计算站点降雨频率估计值,分析暴雨高风险区划。结果表明:根据 1 h、6 h、12 h 和 24 h 年最大降水量资料广东省可分别划分为 13、15、16 和 16 个水文气象一致区,大部分一致区的最优分布为广义极值分布和广义正态分布;降雨频率估计值的空间分布态势在相同时段不同重现期下基本一致,而不同时段存在一定差异,1 h 暴雨高风险区位于西南部沿海阳江附近,6 h、12 h 和 24 h 暴雨高风险区位于阳江、珠江三角洲广州到清远和东部沿海陆丰附近区域。

关键词:暴雨高风险区;地区线性矩频率分析;水文气象一致区;降雨频率估计值;广东省
中图分类号:P333.2 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2022)02-0007-10

High-risk rainstorm zonation of Guangdong Province // LIAO Yifan¹, LIN Bingzhang², DING Hui¹ (1. School of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Applied Hydrometeorological Research Institute, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Using 1 h, 6 h, 12 h, and 24 h annual maximum rainfall data of Guangdong Province and the buffer zone around it, the hydrometeorological regional L-moments frequency analysis method was used to obtain rainfall quantile estimates, and the high-risk rainstorm areas (HRRAs) of Guangdong Province were investigated. The results show that Guangdong Province was delineated into 13, 15, 16, and 16 hydrometeorological homogeneous regions (HMHRs) for 1 h, 6 h, 12 h, and 24 h annual maximum rainfall data, respectively. The best-fit frequency distributions for most HMHRs were generalized extreme-value and generalized normal distributions. The spatial distributions of rainfall quantiles for the same duration were similar at different return periods, while there were certain differences for different durations. HRRAs of 1 h data was located near Yangjiang along the southwest coast; HRRAs of 6 h, 12 h, and 24 h data were located around Yangjiang, Guangzhou of Pearl River Delta to Qingyuan, and Lufeng on the east coast.

Key words: high-risk rainstorm area; regional L-moments frequency analysis; hydrometeorological homogeneous region; rainfall quantile estimates; Guangdong Province

近几十年来,我国由暴雨造成的洪涝灾害事件频繁发生,且呈显著加剧的趋势,对人民的生命财产安全造成了严重的威胁^[1]。广东省是中国大陆最南部的沿海省份,东西北三面连接内陆,南面濒临南海,邻近西太平洋,受西风带天气系统和热带天气系统影响频繁,加上南岭及其他山脉的地形作用,降水量十分充沛,暴雨洪涝成为广东省最主要的气象灾害之一。尤其是短历时暴雨所引发的洪涝灾害突发性强,危害性更高。由于广东省地形复杂,不同区域

受天气系统的影响程度各有差异,使得降水的时空分布不均匀^[2],给暴雨洪涝灾害的预警和防范造成一定难度。因此,对广东省的暴雨进行频率分析并研究其空间分布特征,有助于防灾减灾工作的开展,减少暴雨洪涝灾害带来的损失。

过去我国常用的水文频率分析方法是“单站、单时段、单一线型、基于常规矩的适线法”,线型通常选择皮尔逊 III 型曲线^[3]。然而单站分析需要较长的序列资料,序列长度的不足和观测站点的缺乏

基金项目:中国水利水电科学研究院山洪灾害防治项目(SHZH-IWHR-72);江苏省水利科技项目(2018020)

作者简介:廖一帆(1987—),女,博士研究生,主要从事极端降水及水文频率分析研究。E-mail: lyifan322@163.com

通信作者:林炳章(1944—2020),男,教授,主要从事水文气象研究。E-mail: lbz@nuist.edu.cn

很大程度上影响了降雨频率估计值的可靠性^[4],而且不能反映空间分布规律;常规矩估计的统计参数具有很大的偏态性,因而得到的降雨频率估计值极不稳定^[3]。地区线性矩法是 Hosking 等^[5]在线性矩的基础上提出的一种地区频率分析方法。美国国家海洋大气管理总署(NOAA)自1991年起在美国开展地区线性矩法在防洪设计标准的应用研究,从1997年起分区分批对全国的暴雨频率图集进行更新,于2006年提出了一套基于次序统计量的线性矩法结合基于水文气象一致区的地区分析法进行暴雨频率分析的完整系统^[3,6-7]。近年来,国内有不少学者利用降雨资料进行了地区线性矩法的应用研究^[8-16],证明了该方法的优越性:线性矩相比常规矩具有良好的估计参数的不偏性和对特大值的稳健性;地区分析法能够充分利用邻近站点的信息,提高降雨频率估计值的准确性,并且能更准确地获得其空间分布。

暴雨高风险区划是基于水文气象地区线性矩频率分析法得到的一个地区内某一定历时、一定频率(重现期)降雨事件中最大雨强的空间分布^[12,15]。实际上,暴雨高风险区划的概念为定量估算“强降雨雨强、降雨落区、概率”三者的关系奠定了理论基础,填补了设计暴雨理论中强降雨雨强空间分布的空白;而现有的暴雨空间分布仅探讨暴雨的点—面关系。暴雨高风险区划为中小流域洪水尤其是山洪防治、预警提供了理论基础。

关于广东省降雨频率分析的研究, Yang 等^[17]以珠江流域为研究区,采用地区线性矩法对1 d、3 d、5 d和7 d年最大降水量进行频率分析,并联系气候背景及地形特征,探析流域极端降雨的时空分布规律;黄强等^[18]利用广东省年最大日降水量资料,应用地区线性矩法,得到不同流域分区100 a或500 a以下重现期可靠性较高的降雨频率估计值。这些都是对1 d及以上长历时极值降雨的频率分析,而对小时历时降雨的频率分析比较少。

本文应用水文气象地区线性矩频率分析法以及在此基础上发展的暴雨高风险区划概念和技术,根据1 h、6 h、12 h和24 h年最大降水量资料对广东省进行暴雨高风险区划研究,绘制暴雨高风险区划图并分析其空间分布特征,以期为广东省的防洪规划设计和洪涝灾害早期预警提供参考。

1 资料与方法

1.1 研究资料

广东省陆地面积约17.97万 km²,为提高研究区边界处降雨频率估计值的可靠性,本文将研究区

广东省向内陆扩大约30~50 km的范围作为缓冲区。在研究区和缓冲区收集水文雨量站1 h、6 h、12 h和24 h的历史年最大降水量资料。经质量控制,去掉明显错误的数值,舍去不一致的资料序列,最终筛选出资料序列长度在20 a及以上的站点用于分析,其中具备1 h年最大降水量资料的有202个站点(其中广东省内有92个站点),具备6 h、12 h和24 h年最大降水量资料的有291个站点(其中广东省内有157个站点)。研究区及周围的地形和所有站点的分布如图1,可见广东省内站点的空间分布比较均匀,缓冲区站点密度略大于广东省内站点密度。站点降水序列范围从1939—2015年,长度不等,平均长度约34 a。

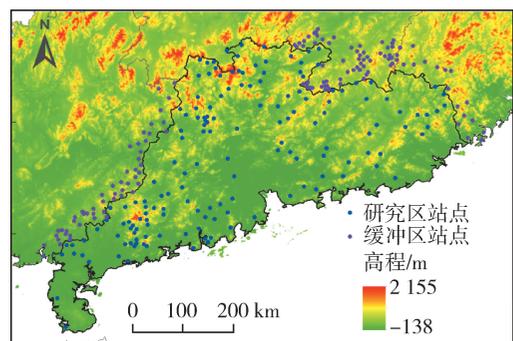


图1 广东省及周围缓冲区地形和站点

Fig. 1 Elevation and stations of Guangdong Province and buffer zone around it

1.2 研究方法

Hosking^[19]将线性矩定义为次序统计量线性组合的期望值,并定义了类似于常规矩的统计特征参数:线性矩离差系数 C_{vL} 、线性矩偏态系数 C_{sL} 和线性矩峰度系数 C_{kL} 。基于水文气象地区线性矩法的暴雨高风险区划研究,以线性矩作为参数估计方法,在水文气象一致区划分的基础上,选择各一致区的最优分布线型,再根据地区分析法推求各站点的降雨频率估计值,并进行时空一致性调整,最终获得不同重现期下降雨的空间分布。

1.2.1 水文气象一致区划分

地区分析法的前提是划分水文气象一致区。由于不同时段分析的站点不一定完全相同,降雨的分布特征也不相同,一致区的划分应分不同时段进行。水文气象一致区的划分和判定主要从以下3个方面进行:

- a. 气象相似性。一致区内满足降雨的水汽流入和气象成因一致。
- b. 水文相似性。一致区内所有站点的统计参数 C_{vL} 和 C_{sL} 在一定的容忍度内一致。采用基于 C_{vL} 计算值的异质性检验指标 H_1 来判断所划分的子区

是否为一致性区域^[5]。当 $H_1 < 1$ 时,表示该子区为可以接受的一致区。同时,利用各站点的 C_{sL} 对子区进行判别和调整,选出 C_{sL} 特大值和特小值对应的站点,分别考察删除该站点前后,整个子区站点是否存在 100 a 重现期降雨频率估计值小于实测资料序列中的最大降水量值的不合理情况。若删除该站点后,这种不合理情况有较大改善,则需将该雨量站点移至相邻子区分析,否则可以保留。

c. 不和谐性检验。检验所划分的子区内是否存在不和谐的站点,若站点的不和谐性指标 D_i 超过一定的临界值,则可认为该站点是不和谐站点。 D_i 具体计算方法和子区内不同站点数对应的临界值可参考 Hosking 等^[5]的研究。对不和谐站点进一步检查原数据的可靠性,并考虑将其调整至相邻子区或单独分区。如果该站点较大的 D_i 值是由局部极端气象事件所引起的,也可以保留在当前区域。

1.2.2 一致区线型选择

选择 5 种三参数分布线型作为一致区的候选分布线型,根据其尾端形态由厚至薄依次为:广义逻辑分布(GLO)、广义极值分布(GEV)、广义正态分布(GNO)、广义帕累托分布(GPA)和皮尔逊Ⅲ型分布(P-Ⅲ)。采用以下 3 种拟合优度检验方法来选择各一致区的最优分布线型:

a. 蒙特卡洛模拟检验。该检验通过比较一致区内区域平均的线性矩峰度系数与分布函数的线性矩峰度系数之间的差异来考察分布函数拟合的质量。检验的统计量 Z_{DIST} 的具体计算方法可参考 Hosking 和 Wallis 的研究^[5]。若统计量满足 $|Z_{DIST}| \leq 1.64$,认为该分布函数拟合结果是合理可接受的,并且 $|Z_{DIST}|$ 越接近于 0,认为拟合效果越好。

b. 样本线性矩的均方根误差检验。该检验利用一致区内各站点的线性矩峰度系数与分布函数的线性矩峰度系数之间的差值,再根据站点资料序列长度进行加权平均得到的均方根误差(RMSE)来比较分布函数的拟合效果^[7],具有最小 RMSE 的分布函数拟合效果最好。

c. 实测数据检验。该检验首先分别计算一致区内各站点不同重现期下的经验频率与候选分布函数理论频率之间的相对误差(RE),取所有站点的 RE 平均值^[7];再将 5 种候选分布函数在 2 a、5 a、10 a、25 a 和 50 a 重现期的 RE 平均值从大到小排列,各重现期下的排列序号求和作为相应分布函数的 RE 分数 S_{RE} , S_{RE} 越高、RE 越小,表明该分布函数拟合效果越好。

最后,综合 3 种检验方法的结果,确定各一致区

拟合效果最佳的分布函数。

1.2.3 降雨频率估计值计算及时空一致性调整

a. 降雨频率估计值计算。根据地区分析法,一致区内各站点的年最大降水量序列可以分解为:反映该区域共有降雨特性的地区分量和反映该站点自身降雨特性的本地分量。本地分量一般取各站年最大降水量序列的平均值。对一致区内各站点的年最大降水量序列去均值化后,应用线性矩法推求一致区最优分布函数的参数估计值,确定配合数据最佳的无量纲概率分布曲线,此分布曲线在不同频率下的估计值即该一致区的地区分量,或称地区增长因子,则第 i 站点 T_j 重现期的降雨频率估计值 Q_{T_j} 可表示为地区增长因子 q_{T_j} 和年最大降水量序列的平均值 \bar{x}_i 的“叠加”^[3]。

b. 时段间一致性调整。由于不同时段分布函数的适线是独立进行的,获得的不同时段的降雨频率估计值曲线可能会出现交叉的情况,即从交叉点之后,时段较短的降雨频率估计值比时段较长的降雨频率估计值大,这与实际情况不符。本文采用“误差分摊”的方法^[7]调整时段间不一致的降雨频率估计值,其思路为:计算不一致起点前一频率下相邻的较长时段与较短时段降雨频率估计值的比值,将比值大于 1 的误差部分,按频率步长权重分配到不一致起点之后的各不一致频率点上,加上 1 作为相应频率下新的比值,乘以原较短时段降雨频率估计值,即得到较长时段调整后的降雨频率估计值,而其他正常的降雨频率估计值部分不改变。

c. 空间一致性调整。同理,由于雨量站点资料有限、站点分布不均匀,以及各一致区的数据是独立进行分布函数选择和参数化的,可能会造成计算得到的降雨频率估计值在相邻一致区边界处出现不连续、梯度较大的现象。本文采用“往返两次”空间平差法^[20]来调整降雨频率估计值的空间不一致性,其步骤如下:①构造一个与站点分辨率大致相同的空间网格,采用克里金插值方法,将不规则的站点上的降雨频率估计值插值到规则网格点上;②采用反距离加权插值法,利用规则网格点上的降雨频率估计值反向插值回各站点,即得到站点空间平差校正后的降雨频率估计值。

2 结果与分析

2.1 水文气象一致区划分

首先,根据广东省的地形和气候初步划分水文气象一致区。从广东省地形(图 1)来看,整体地势从北部山地向南部沿海呈逐步降低趋势。北部群山是南岭的组成部分,东部山地由三列东北—西南走

向的山脉构成,分别为九连山、罗浮山和莲花山^[1]。广东省暴雨的主要成因是锋面类暴雨和台风类暴雨,水汽主要来源于南面的南海^[21]。通常南岭南侧、莲花山东南坡等迎风面降水量较大,而背风面的谷底和内陆盆地降水量较少。另外珠江三角洲平原是一个尺度很大的南开喇叭口地形,对气流有辐合抬升作用,使降水量和降雨强度加大^[1]。综合以上分析,考虑将北部、东部和西南部划分不同的一致区,并且喇叭口地形、山脉迎风面和背风面之间要进行区分。

在初步分区的基础上,分不同时段,利用各站点的 C_{vL} 和 C_{sL} 进一步细分和调整。图 2 和图 3 给出了站点 C_{vL} 和 C_{sL} 的空间分布,尽可能将 C_{vL} 和 C_{sL} 接近的站点划分为一个子区,对子区内 C_{sL} 特大值和特小值的站点进行考察,并用异质性检验指标 H_1 检验子区是否满足一致区标准。经过多次反复调整,最终确定了各时段水文气象一致区的划分方案,针对 1 h、6 h、12 h 和 24 h 年最大降水量序列分别划分了 13、15、16 和 16 个一致区(图 2 中以蓝色实线划分的区域表示)。不同时段的分区总体形态上相似,其中存在的差异可能是由于长历时站点数比短历时站点数多,且 C_{vL} 和 C_{sL} 的梯度较大,因此在一些区域需要更细的划分。表 1 列出了各时段各子区的站点数、异质性检验指标 H_1 值和诣谐指标 D_i 超过临界值的站点数。所有子区 $H_1 < 1$,表明都可以认为

是一致区。1 h、6 h 和 12 h 年最大降水量序列的部分子区存在少数不诣谐站点,其中 1 h 时段的第三个一致区(1 h-3 区)的大众站 D_i 值最高,达 4.41(相应的临界值为 3)。通过对原数据序列分析发现,该站 2003 年的最大 1 h 降水量为 94.5 mm,同时也是该子区所有站点数据序列中的最大值,造成了该站的 C_{vL} 和 C_{sL} 值较周围站点偏大,所以 D_i 值偏高。但该站序列长度仅为 21 年,不考虑单独分区,因此还是将其保留在 1 h-3 区。其他子区的不诣谐站点的 D_i 值只是略高于临界值,且分区过程中已经将这些站点划入不同的子区进行比较,从中选择了站点不诣谐度最小的方案。

2.2 一致区内最优频率分布线型的选择

对所划分的一致区,采用蒙特卡洛模拟检验、均方根误差检验和实测数据检验,考察 5 种候选分布线型 GLO、GEV、GNO、GPA 和 P-III 的拟合效果。以 24 h 水文气象一致区为例,各一致区 3 种检验的结果见表 2。如 24 h 时段的第一个一致区(24 h-1 区),3 种检验中都是 GEV 分布表现最好,因此该一致区的最优分布为 GEV。又如 24 h-5 区,GEV 分布在蒙特卡洛模拟检验和实测数据检验中表现最好,而 RMSE 最小和次小的分布分别为 GNO 和 GEV,但两者 RMSE 相差不大,综合 3 种检验结果,选取 GEV 为该一致区的最优分布。对各时段、各一致区进行类似的分析,最终可以确定所有一致区的最优

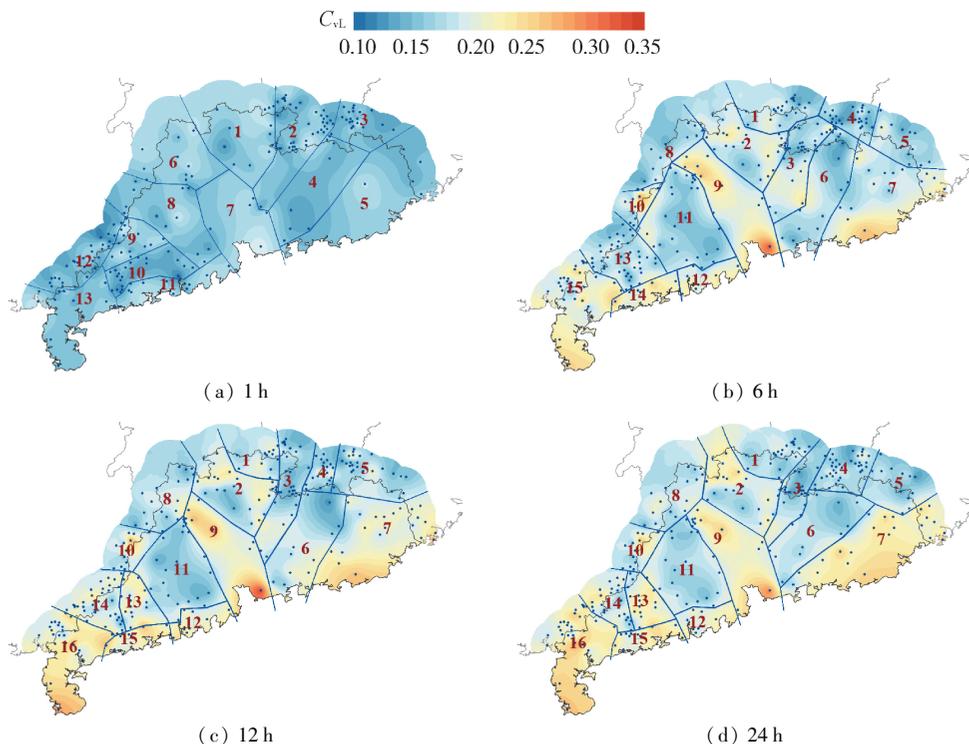


图 2 广东省不同时段年最大降水量序列的 C_{vL} 空间分布及水文气象一致区划分示意图

Fig. 2 Hydrometeorological homogeneous regions and distributions of C_{vL} for annual maximum rainfall data of different durations in Guangdong Province

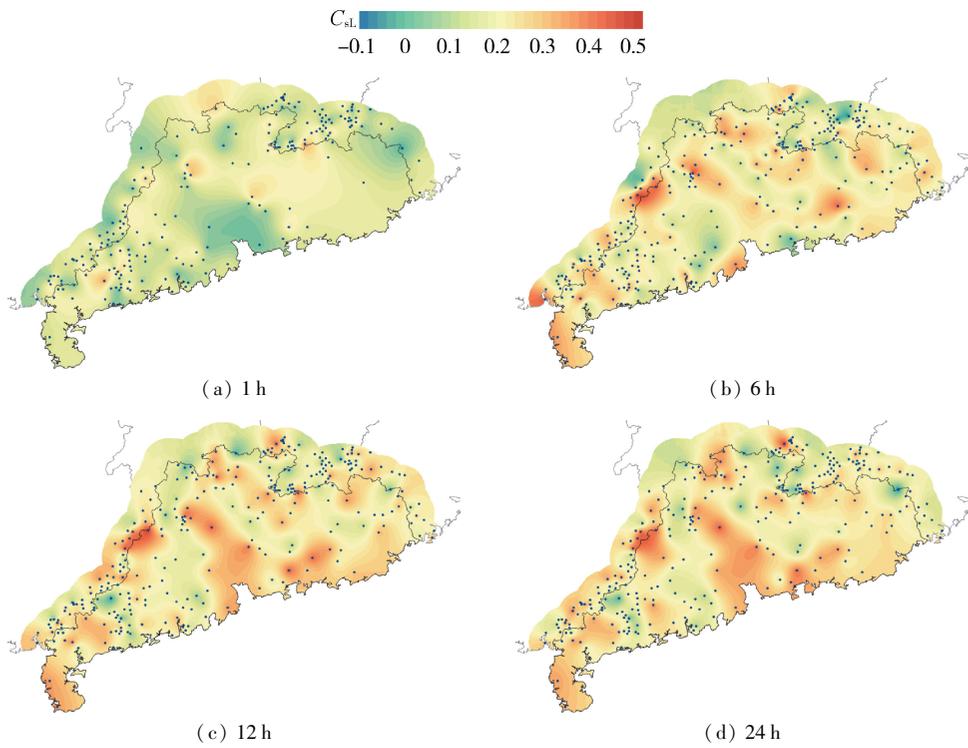


图3 广东省不同时段年最大降水量序列的 C_{sl} 空间分布

Fig. 3 Distributions of C_{sl} for annual maximum rainfall data of different durations in Guangdong Province

表1 广东省各水文气象一致区的站点数及异质性检验和不和谐性检验结果

Table 1 Numbers of stations and results of homogeneity and discordancy tests for hydrometeorological homogeneous regions of Guangdong Province

一致区	1 h 一致区信息			6 h 一致区信息			12 h 一致区信息			24 h 一致区信息	
	站点数	H_1	不和谐站点数	站点数	H_1	不和谐站点数	站点数	H_1	不和谐站点数	站点数	H_1
1	15	-1.45	0	21	0.77	0	12	-0.84	0	22	-1.26
2	41	-0.59	2	27	-1.24	0	25	0.18	0	22	-0.41
3	20	-0.87	1	26	0.80	0	29	-0.97	0	20	-0.33
4	8	-1.11	0	25	0.57	1	21	0.85	1	36	-0.64
5	5	-0.11	0	12	0.65	0	26	0.84	0	12	0.71
6	10	-1.01	0	17	0.04	0	11	0.65	0	12	-1.42
7	5	-0.16	0	18	0.19	0	21	-0.64	0	22	-1.54
8	12	-0.14	0	12	-0.72	0	18	-0.52	0	16	-1.06
9	13	-1.13	0	11	-0.18	1	9	0.37	0	12	-0.32
10	23	-1.18	1	10	0.04	0	12	-0.06	0	12	-0.13
11	10	-1.53	0	26	-0.62	0	20	-1.23	0	19	-1.35
12	30	-0.95	1	8	-0.97	0	8	-1.23	0	7	-0.92
13	10	-1.69	0	40	-1.03	3	14	-0.50	0	15	-0.85
14				8	-0.30	0	34	-0.69	1	24	0.43
15				30	-0.05	2	8	0.24	0	11	-0.93
16							23	0.12	0	29	-1.40

分布(表3)。由表3可以看出,选择作为最优分布最多的是GEV(占60%),其次是GNO(占38%),只有24h-12区选择了GPA。

2.3 降雨频率估计值计算及时空不一致性调整

由上一步选择的各时段各一致区的最优分布函数推求的地区增长因子,与相应时段各站点的年最大降水量平均值相乘,即得到各站点在各重现期下的降雨频率估计值(1h、6h、12h和24h的降雨频率

估计值分别表示为 Q_{1h} 、 Q_{6h} 、 Q_{12h} 和 Q_{24h})。图4给出了紫洞站和犁市站各时段降雨频率估计值随重现期变化的曲线。可以看出,同一时段,降雨频率估计值随重现期的增加而增加,相同重现期下,降雨频率估计值也随时段的增加而增加,这是符合统计规律的。

根据前文的分析,此时计算得到的降雨频率估计值会存在时间或空间不一致的问题,因此需要进

表2 广东省24h水文气象一致区拟合优度检验结果

Table 2 Goodness-of-fit test results for 24 h hydrometeorological homogeneous regions of Guangdong Province

一致区	蒙特卡洛模拟检验 Z_{DIST}					均方根误差检验 $RMSE/10^{-5}$					实测数据检验 S_{RE}				
	GLO	GEV	GNO	GPA	P-III	GLO	GEV	GNO	GPA	P-III	GLO	GEV	GNO	GPA	P-III
1	—	0.01	-0.63	—	—	8 221	6 146	6 625	8 949	7 943	15.5	19.0	17.0	9.5	14.0
2	0.39	-1.22	—	—	—	6 055	5 250	6 158	9 851	8 534	15.0	20.5	18.5	7.0	14.0
3	—	0.52	0.33	—	-0.43	7 501	5 120	4 946	9 203	5 015	7.0	14.5	15.5	15.0	23.0
4	—	1.31	0.45	—	-1.23	7 928	5 807	5 506	8 043	5 775	9.0	15.5	18.5	12.0	20.0
5	1.59	-0.50	-0.91	—	—	6 928	5 857	5 497	10 541	5 861	9.0	19.0	16.0	12.0	19.0
6	1.64	0.13	-0.39	—	-1.38	6 908	4 627	4 837	7 796	6 201	14.0	17.0	15.5	13.0	15.5
7	—	—	1.27	—	-0.42	8 693	6 168	5 565	6 028	5 780	9.0	15.5	20.5	12.0	18.0
8	—	-0.07	-0.52	—	-1.46	7 750	5 995	6 058	9 507	6 807	9.5	16.0	15.5	14.0	20.0
9	1.15	0.18	-0.64	—	—	7 105	5 745	5 603	7 634	7 550	13.5	20.0	15.5	13.5	12.5
10	0.67	-0.50	-1.13	—	—	9 147	7 871	9 273	10 492	12 209	19.0	19.0	17.0	8.5	11.5
11	—	0.44	-0.06	—	-1.13	7 954	6 239	6 172	9 583	6 561	11.5	14.0	16.0	15.0	18.5
12	—	—	—	-0.62	—	11 962	8 154	7 642	3 110	6 412	10.5	14.5	14.5	18.0	17.5
13	—	0.75	0.21	—	-0.85	7 993	5 719	5 794	8 096	6 396	13.5	18.0	20.0	6.0	17.5
14	—	1.15	0.54	—	-0.77	7 725	5 204	5 037	8 048	5 197	13.0	18.5	18.0	8.0	17.5
15	—	0.85	0.37	—	-0.59	6 819	3 869	3 541	6 705	3 959	15.0	19.5	20.5	8.0	12.0
16	—	-0.07	-1.09	—	—	5 969	4 253	4 419	7 905	6 307	15.5	18.5	18.0	8.5	14.5

注:粗体标记对应的分布线型为当前检验中拟合相应一致区数据效果最好的分布线型;蒙特卡洛模拟检验结果中“—”表示 $|Z_{DIST}| > 1.64$ 。

表3 广东省水文气象一致区的最优分布线型

Table 3 Best-fit distributions for hydrometeorological homogeneous regions of Guangdong Province

一致区	1 h	6 h	12 h	24 h
1	GNO	GEV	GEV	GEV
2	GNO	GEV	GEV	GEV
3	GNO	GEV	GEV	GNO
4	GEV	GEV	GNO	GNO
5	GNO	GEV	GEV	GEV
6	GNO	GEV	GEV	GEV
7	GEV	GEV	GNO	GNO
8	GEV	GEV	GEV	GEV
9	GEV	GEV	GEV	GEV
10	GNO	GEV	GEV	GEV
11	GNO	GEV	GEV	GNO
12	GNO	GNO	GNO	GPA
13	GEV	GEV	GNO	GNO
14		GNO	GNO	GNO
15		GNO	GNO	GNO
16			GEV	GEV

行时空一致性检验及调整。从较短时段到较长时段,依次检查各站点两相邻时段降雨频率估计值的一致性,对站点存在的较长时段比较短时段降雨频率估计值小的异常部分,采用“误差分摊”的方法进行调整。最终对5站的 Q_{12h} 、34站的 Q_{24h} 进行了调整。这里以百候站为例分析时段间一致性调整的过程。图5给出了该站调整前后降雨频率估计值曲线的对比,该站缺少1h年最大降水量数据,因此只分析 Q_{6h} 、 Q_{12h} 和 Q_{24h} ,曲线数据点上的数值为对应重现期下 Q_{24h} 和 Q_{12h} 的比值。调整前, Q_{24h} 和 Q_{12h} 曲线在重现期100a到200a之间出现了交叉,从200a到10000a, Q_{24h} 小于 Q_{12h} ,即两者的比值小于1。于是

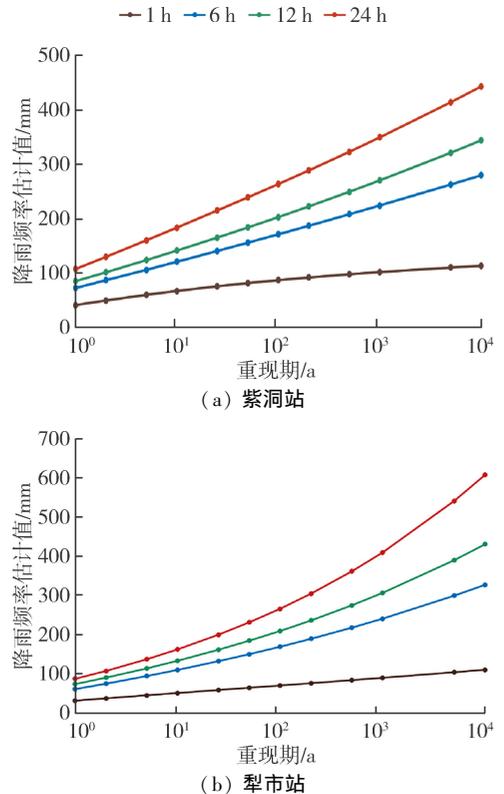
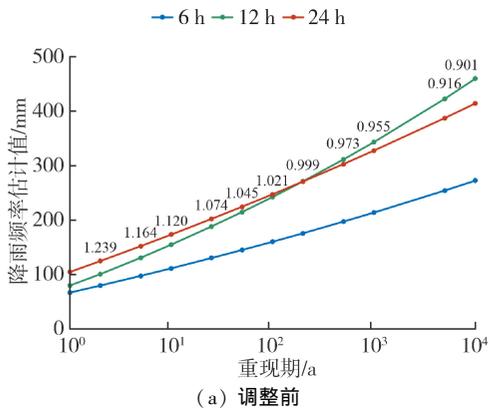
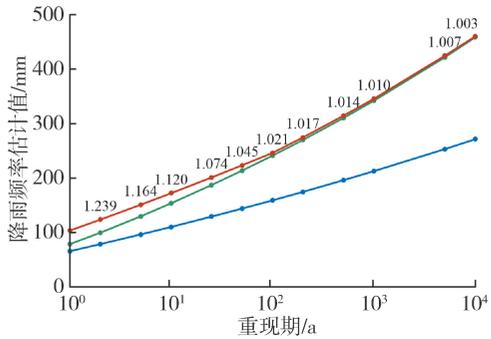


图4 紫洞站和犁市站降雨频率估计值曲线
Fig. 4 Frequency curves of rainfall quantiles at Zidong and Lishi stations

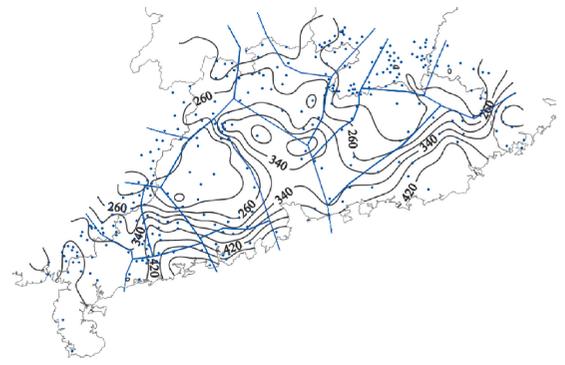
将100a重现期处 Q_{24h} 和 Q_{12h} 的比值误差分配到200a到10000a之间各重现期上,得到新的比值及 Q_{24h} 。调整后, Q_{24h} 和 Q_{12h} 曲线不再交叉, Q_{24h} 和 Q_{12h} 的比值都大于1。经过时段间一致性调整后的降雨频率估计值更符合降雨的统计特性,增强了不同时段间降雨频率估计值的可比性。



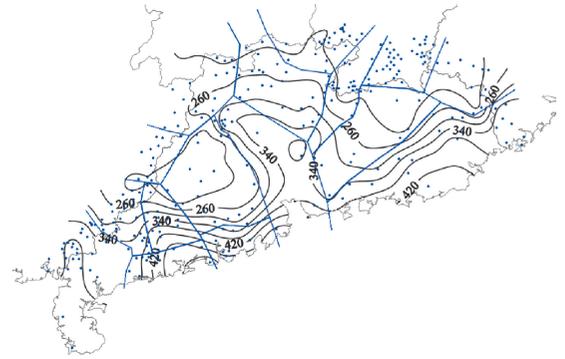
(a) 调整前



(b) 调整后



(a) 调整前



(b) 调整后

图5 百候站时段间一致性调整前后的降雨频率估计值曲线

Fig. 5 Frequency curves of rainfall quantiles at Baihou Station before and after consistency adjustment over durations

在时段间调整的基础上,采用“往返两次”空间平差法调整空间的不一致性。根据各时段的站点密度,第一步插值的网格分辨率1 h数据取 $0.33^{\circ} \times 0.33^{\circ}$ (约 $33 \text{ km} \times 33 \text{ km}$),6 h、12 h和24 h数据取 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ (约 $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$)。这里以24 h数据的50 a重现期为例考察降雨频率估计值空间调整的效果(图6),调整前降雨频率估计值的等值线在部分一致区边缘处会存在梯度突然增大的现象,而调整后,一致区边缘处的梯度有所缓和,但整体上主要的分布形势和大值中心不变。

2.4 暴雨高风险区划图分析

将时空一致性调整后各站点在不同时段、不同重现期下的降雨频率估计值,通过克里金法空间插值,获得相应的降雨频率估计值的空间分布,即暴雨高风险区划图,其中最大雨强区域为暴雨高风险区。图7~10给出了在1 h、6 h、12 h和24 h时段25 a、50 a和100 a重现期下的暴雨高风险区划图。总体上看,同一时段不同重现期下,降雨频率估计值的空间分布态势基本一致;不同时段相同重现期进行比较,6 h、12 h和24 h时段下的降雨频率估计值的空间分布态势较相似,而与短历时1 h降雨频率估计值的空间分布存在一定差异。所有时段最明显的暴雨高风险区位于广东西南沿海阳江附近(图7~10

图6 空间一致性调整前后降雨频率估计值分布(单位:mm)

Fig. 6 Contour maps of rainfall quantiles before and after spatial adjustment(unit: mm)

中的C1),随着重现期增大,其范围逐渐延伸至西南沿海阳江—江门一带。6 h、12 h和24 h降雨频率估计值的空间分布还呈现出两个较明显的暴雨高风险区,分别位于珠江三角洲广州到北部山区南侧清远附近区域(图8~10中的C2)和东部沿海陆丰附近(图8~10中的C3),且重现期越大,两个区域的范围越大、中心值越大。不同时段不同重现期下暴雨高风险区中心的降雨频率估计值见表4,可见4个时段C1处中心值都最大,为最主要的暴雨高风险区,6 h、12 h和24 h时段下位于C2和C3处的中心值相当,C2处中心值在重现期较小时小于C3处,而随着重现期增大变为大于C3处中心值。6 h、12 h和24 h时段下的降雨频率估计值在3个暴雨高风险区的南侧都出现了低值区,分别位于西部的云浮—肇庆附近、北部的乐昌附近和东部的五华附近。这3个暴雨高风险区和3个低值区的位置与广东省的3个多雨中心和3个少雨中心位置相一致,形成的原因与不同地区主要受影响的天气系统不同,以及地形的阻挡、辐合抬升作用有关^[22-23],表明此暴雨高风险区划图符合广东省降雨的空间分布特征。6 h、12 h和24 h时段暴雨高风险区C2所在的珠江三角洲区域,在1 h时段没有呈现明显的高值中心,说明该区域主要受较长历时暴雨的影响。相反,1 h

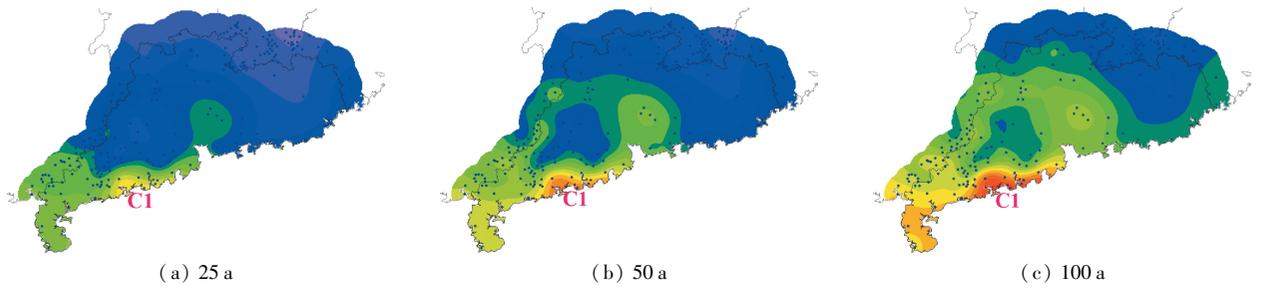
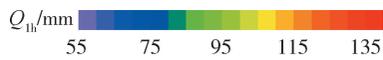


图 7 不同重现期下基于 1 h 年最大降水量序列的广东省暴雨高风险区划图

Fig. 7 High-risk rainstorm areas of Guangdong Province with different return periods based on 1 h annual maximum rainfall data

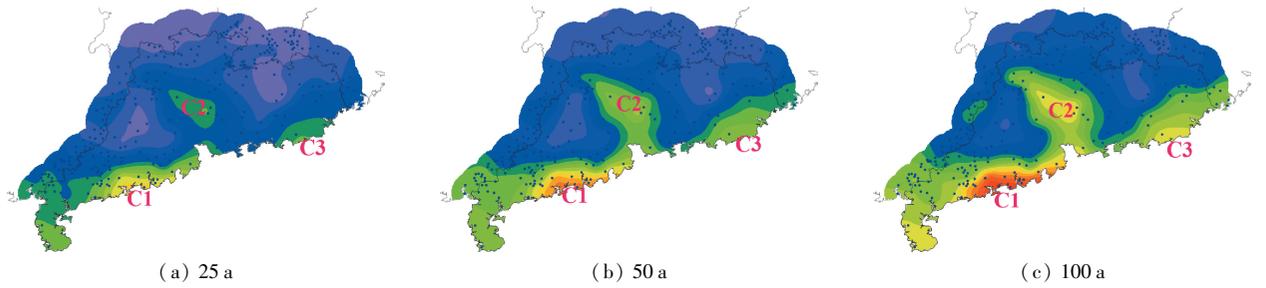


图 8 不同重现期下基于 6 h 年最大降水量序列的广东省暴雨高风险区划图

Fig. 8 High-risk rainstorm areas of Guangdong Province with different return periods based on 6 h annual maximum rainfall data

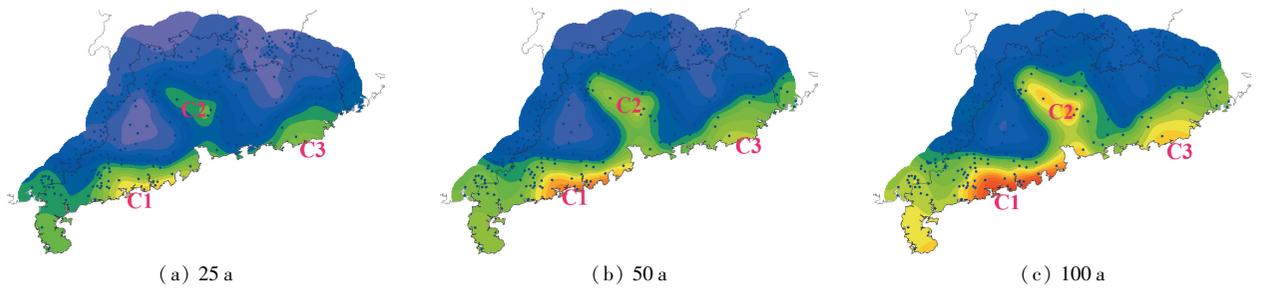
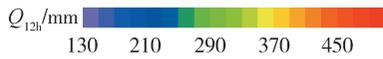


图 9 不同重现期下基于 12 h 年最大降水量序列的广东省暴雨高风险区划图

Fig. 9 High-risk rainstorm areas of Guangdong Province with different return periods based on 12 h annual maximum rainfall data

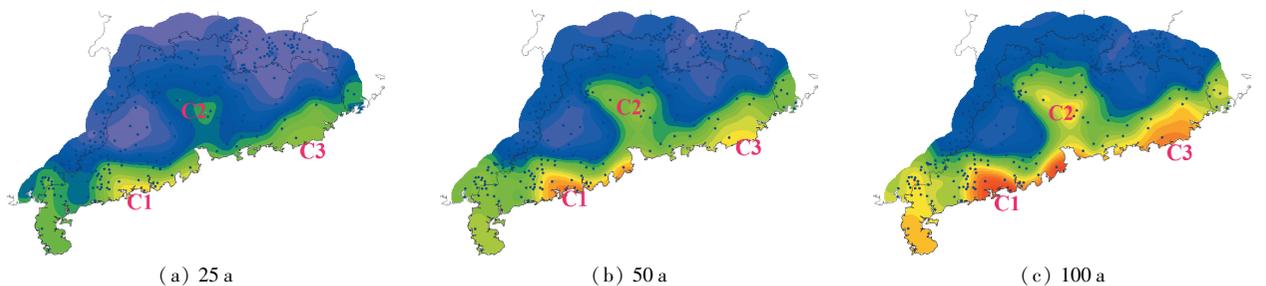
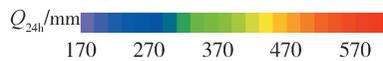


图 10 不同重现期下基于 24 h 年最大降水量序列的广东省暴雨高风险区划图

Fig. 10 High-risk rainstorm areas of Guangdong Province with different return periods based on 24 h annual maximum rainfall data

时段雷州半岛在不同重现期的降雨频率估计值都比较高,说明雷州半岛主要受短历时暴雨影响。另外,广东东部由于1 h 序列所用资料的站点比较稀疏,一些局地分布的变化可能显示不出,无法确定是否存在高风险区。由此可以说明,不同区域主要的成灾暴雨历时是不同的^[24],实际应用时,应充分调查不同区域历史主要暴雨、洪涝灾害事件,得到成灾暴雨的平均历时和平均降水量,在此基础上选择相应设计时段和重现期下的暴雨高风险区划图进行重点分析。

表4 广东省暴雨高风险区中心降雨频率估计值

Table 4 Rainfall quantiles at centers of high-risk rainstorm areas of Guangdong Province

降雨时段/h	暴雨高风险区	不同重现期降雨频率估计值/mm				
		10 a	25 a	50 a	100 a	200 a
1	C1	95.6	109.9	120.6	131.1	141.5
	C2	255.8	310.2	353.2	397.7	444.6
6	C1	177.1	224.4	265.7	312.2	365.3
	C2	177.7	218.4	252.6	289.8	331.1
12	C1	316.0	383.2	436.1	490.4	547.4
	C2	223.9	289.3	348.7	418.0	500.2
24	C1	242.8	295.5	337.1	380.4	425.9
	C2	381.4	459.5	520.4	582.2	647.1
24	C1	271.0	343.6	408.3	482.3	568.3
	C2	313.9	384.0	439.0	495.8	558.1

3 结 论

a. 依据水文气象一致区划分准则,基于1 h、6 h、12 h 和 24 h 年最大降水量序列,分别将广东省及其周围缓冲区划分为13、15、16 和 16 个水文气象一致区;采用3 种拟合优度检验方法,确定了各水文气象一致区的最优分布线型,其中 GEV 和 GNO 是选择最多的两种分布。

b. 根据地区分析法,计算各站点不同时段、不同重现期下的降雨频率估计值,并采用“误差分摊”法和“往返两次”空间平差法进行时段间和空间的一致性调整,最终获得时间上更符合统计特性、空间分布更合理的降雨频率估计值成果。

c. 相同时段降雨频率估计值的空间分布态势在不同重现期下基本一致,而1 h 时段与6 h、12 h 和 24 h 时段的降雨频率估计值空间分布存在一定差异。广东省多小时时段最主要的暴雨高风险区位于西南沿海阳江—江门区域;6 h、12 h 和 24 h 时段的第二、第三个暴雨高风险区分别位于珠江三角洲广州到北部山区南侧清远附近和东部沿海陆丰附近区域。该暴雨高风险区划图符合广东省降雨的空间分布特征,可为防洪规划设计以及洪涝灾害风险早期预警提供参考。

参考文献:

[1] 黄国如,罗海婉,卢鑫祥,等. 城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述[J]. 水资源保护,2020,36(6):1-6. (HUANG Guoru, LUO Haiwan, LU Xinxiang, et al. Study on risk analysis and zoning method of urban flood disaster[J]. Water Resources Protection,2020,36(6):1-6. (in Chinese))

[2] 郑腾飞,刘显通,万齐林,等. 近50年广东省分级降水的时空分布特征及其变化趋势的研究[J]. 热带气象学报,2017,33(2):212-220. (ZHENG Tengfei, LIU Xiantong, WAN Qilin, et al. The characteristics of precipitation in Guangdong Province over the past 50 years: dependence on rainfall intensity [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2017, 33 (2): 212-220. (in Chinese))

[3] 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[C]//邓坚. 中国水文科技新发展,2012 中国水文学学术讨论会论文集. 南京:河海大学出版社,2012:50-63.

[4] BOBÉE B, RASMUSSEN P F. Recent advances in flood frequency analysis [J]. Reviews of Geophysics, 1995, 33 (Sup2):1111-1116.

[5] HOSKING J R M, WALLIS J R. Regional frequency analysis: an approach based on L-moments [M]. New York:Cambridge University Press,2005.

[6] LIN B Z, VOGEL J L. A comparison of L-moments with method of moments [C]//Engineering Hydrology, Symposium of American Society of Civil Engineers. ASCE, 1993:443-448.

[7] LIN B Z, BONNIN G M, MARTIN D L, et al. Regional frequency studies of annual extreme precipitation in the United States based on regional L-moments analysis[C]//World Environmental and Water Resource Congress 2006: Examining the Confluence of Environmental and Water Concerns. Omaha:ASCE,2006:1-11.

[8] 梁玉音,刘曙光,钟桂辉,等. 线性矩法与常规矩法对太湖流域降雨频率分析的比较研究[J]. 水文,2013,33(4):16-21. (LIANG Yuyin, LIU Shuguang, ZHONG Guihui, et al. Comparison between conventional moments and L-moments in rainfall frequency analysis for Taihu Lake Basin [J]. Journal of China Hydrology, 2013, 33 (4):16-21. (in Chinese))

[9] 吴俊梅,林炳章,邵月红. 地区线性矩法在太湖流域暴雨频率分析中的应用[J]. 水文,2015,35(5):15-22. (WU Junmei, LIN Bingzhang, SHAO Yuehong. Application of regional L-moments analysis method in precipitation frequency analysis for Taihu Lake Basin[J].

- Journal of China Hydrology, 2015, 35 (5): 15-22. (in Chinese))
- [10] 陈希,林炳章,吴俊梅,等. 水文气象分区线性矩法在广西暴雨频率分析中的应用[J]. 水电能源科学,2014,32(11):5-9. (CHEN Xi, LIN Bingzhang, WU Junmei, et al. Application of hydrometeorological regional L-moments method to storm frequency analysis in Guangxi [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(11) : 5-9. (in Chinese))
- [11] 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 Basin based on hydrometeorological regional L-moments method [J]. Journal of China Hydrology, 2016, 36(6) : 16-23. (in Chinese))
- [12] DING H, LIAO Y F, LIN B Z. High risk flash flood rainstorm area mapping and its application in Jiangxi Province, China [C] // LEI X H, CAI S Y, YU Y, et al. MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2018: 01087.
- [13] 刘梦洋,尹义星,韩翠,等. 基于地区线性矩法的江西省极值降水频率分析[J]. 水电能源科学,2018,36(9):1-5. (LIU Mengyang, YIN Yixing, HAN Cui, et al. Frequency analysis of extreme precipitation in Jiangxi Province based on regional L-moments method [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(9) : 1-5. (in Chinese))
- [14] 李孟芮,敖天其,黎小东. 基于地区线性矩法对四川省水文频率分析的研究[J]. 水利水电技术,2018,49(11):54-61. (LI Mengrui, AO Tianqi, LI Xiaodong. Regional L-moments analysis-based study on hydrological frequency analysis of Sichuan Province [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(11) : 54-61. (in Chinese))
- [15] 商慧,林炳章,徐磊. 可视化降雨频率图集和暴雨高风险区划图集研究[J]. 中国给水排水,2019,35(5):131-138. (SHANG Hui, LIN Bingzhang, XU Lei. Visualization of precipitation frequency atlas & rainstorm high-risk regionalization atlas [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(5) : 131-138. (in Chinese))
- [16] LIAO Y F, LIN B Z, CHEN X Y, et al. A new look at storm separation technique in estimation of probable maximum precipitation in mountainous areas [J]. Water, 2020, 12(4) : 1177.
- [17] YANG T, SHAO Q X, HAO Z C, et al. Regional frequency analysis and spatio-temporal pattern characterization of rainfall extremes in the Pearl River Basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2010, 380(3) : 386-405.
- [18] 黄强,陈子燊,刘曾美,等. 基于线性矩法的广东极端降水区域频率分析[J]. 水资源研究,2013,2(1):7-13. (HUANG Qiang, CHEN Zishen, LIU Zengmei, et al. Regional frequency analysis of extreme rainfall in Guangdong using L-moments approaches [J]. Journal of Water Resources Research, 2013, 2 (1) : 7-13. (in Chinese))
- [19] 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, 52(1) : 105-124.
- [20] 李敏,林炳章,邵月红,等. 地区线性矩法估算的暴雨频率设计值空间连续性问题探讨[J]. 水文,2015,35(4):14-19. (LI Min, LIN Bingzhang, SHAO Yuehong, et al. Study on spatial continuity of precipitation quantile estimates based on regional L-moments analysis [J]. Journal of China Hydrology, 2015, 35 (4) : 14-19. (in Chinese))
- [21] 姚章民,杜勇,张丽娜. 珠江流域暴雨天气系统与暴雨洪水特征分析[J]. 水文,2015,35(2):85-89. (YAO Zhangmin, DU Yong, ZHANG Lina. Analysis of storm weather system and flood characteristics in Pearl River Basin [J]. Journal of China Hydrology, 2015, 35(2) : 85-89. (in Chinese))
- [22] 蒲义良,郭柏成,叶朗明,等. 基于小时降水资料研究广东省降水分布特征[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版),2020,12(4):495-503. (PU Yiliang, GUO Bocheng, YE Langming, et al. Characteristics of precipitation distribution in Guangdong province based on hourly rain-gauge data [J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 12(4) : 495-503. (in Chinese))
- [23] 皋云,李琼芳,周正模,等. 镇江市降雨场次划分与暴雨特性分析[J]. 水资源保护,2021,37(3):43-49. (GAO Yun, LI Qiongfang, ZHOU Zhengmo, et al. Division of rainfall events and analysis of rainstorm characteristics in Zhenjiang City [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3) : 43-49. (in Chinese))
- [24] 严方家,李琼芳,王燕,等. 镇江市中长历时设计暴雨计算[J]. 水资源保护,2021,37(2):108-111. (YAN Fangjia, LI Qiongfang, WANG Yan, et al. Medium and long duration design rainstorm calculation in Zhenjiang City [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2) : 108-111. (in Chinese))

(收稿日期:2020-11-23 编辑:俞云利)