

可视化降雨频率图集和暴雨高风险区划图集研究

商 慧¹, 林炳章², 徐 磊³

(1. 南京信息工程大学 应用气象学院, 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; 3. 欧普迪<珠海>科技有限公司, 广东 珠海 519000)

摘 要: 为了使降雨频率估算成果能够为涉水各行业的规划设计以及洪涝灾害预警和风险分析服务,并为大数据分析奠定科学基础,以厦门地区为例,首次使用包括水文及气象系统雨量站的年最大历史降雨资料,应用水文气象地区线性矩法以及暴雨高风险区划理论和技术,编制厦门地区降雨频率图集和暴雨高风险区划图集,研究降雨频率估计值的数字化以及暴雨高风险区划的可视化展示,建立估算成果的网络共享平台。考虑到暴雨频率估计值的不确定性,首次提供不同时段、不同重现期下频率估计值90%的置信区间,为风险分析提供科学依据。计算结果表明,厦门市东北部为暴雨高风险区;实际资料分析表明,厦门市西北角也可能存在一个暴雨高风险区,但是由于站点过少以及资料序列长度不够,建议今后资料充裕时进一步分析,这将对该地区雨量站的增设起到指导作用。

关键词: 降雨频率图集; 暴雨高风险区划; 地区线性矩法; 水文气象资料; 水文气象一致区; 置信区间; 网络可视化共享平台

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)05-0131-08

Visualization of Precipitation Frequency Atlas & Rainstorm High-risk Regionalization Atlas

SHANG Hui¹, LIN Bing-zhang², XU Lei³

(1. School of Applied Meteorology, 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; 3. OPD <Zhuhai> Technology Co. Ltd., Zhuhai 519000, China)

Abstract: Precipitation frequency atlas & rainstorm high-risk regionalization atlas of Xiamen were established through utilizing the largest historical rainfall data from hydrological and meteorological stations for the first time and application of hydrometeorological homogeneous region linear moment method and rainstorm high-risk regionalization theory and technology. The work aimed to make the results of precipitation frequency estimation serve for the planning, design, flood disaster warning and risk analysis of various industries involved in water, and lay a scientific foundation for big data analysis in Xiamen. The precipitation frequency estimation was digitalized and the rainstorm high-risk regionalization was visualized, and a network sharing platform for the estimation results was established. Considering the uncertainties of the estimated precipitation frequency, the 90% confidence intervals for each period were provided to lay a scientific basis for risk analysis. The results indicated that the northeast of Xiamen was a rainstorm high-risk area. The analysis of actual data showed that the northwest of Xiamen was also a potential rainstorm high-risk area. However, due to the small number of stations and insufficient data sequence length, further analysis was suggested in the future when abundant data were available, which

would play a guiding role in the establishment of rain stations in this region.

Key words: precipitation frequency atlas; rainstorm high-risk regionalization; regional linear moment method; hydrometeorological data; hydrometeorological homogeneous region; confidence interval; web-based visualization platform

厦门地区地处福建省东南部,汛期经常遭受台风暴雨、连续性暴雨的侵袭,由此引发的洪涝灾害给厦门地区造成了巨大的经济损失和人员伤亡,而这种灾害每年必至。因此,对厦门地区开展降雨频率分析研究,编制时-空全覆盖的降雨频率图集,为海绵城市建设和城市防洪排涝规划提供科学的建议,具有重要的现实意义。

水文频率分析需要解决两大问题:参数估计方法的精确性和频率估计值的准确性;同时也面临两大困难:无法通过理论分析推导出配合一组或几组雨量数据最佳的频率分布函数,以及计算的频率估计值的真实值未知^[1-2]。以往我国的频率分析计算一直停留在常规矩法配合“一点、一线加双眼”的水平上^[3],频率估计值可靠性差,已远远不能满足国内涉水行业规划设计的需求^[1]。近半个世纪的水文频率分析实践,从常规矩法、极大似然法、权函数法、概率权重矩法到线性矩法,又发展到地区线性矩法,大大提高了参数估计的不偏性和稳健性,以及频率估计值的可靠性^[2]。另外,水文气象一致区概念的引入,将雨量分解成反映共性的地区分量以及代表当地个性的本地分量两部分,再借助地区频率分析概念和技术,使得每一站点频率估计值的可靠性明显提高。这样,线性矩与地区分析相结合的“地区线性矩降雨频率分析法”,就很好地满足了频率分析的两大要求:精确性和准确性,同时使得推求无资料地区频率的估计值成为可能。

美国国家海洋大气管理总署从20世纪90年代初就开始了采用分区线性矩法对防洪设计标准的研究,于20世纪90年代中期提出了一套完整的地区线性矩法暴雨频率分析的应用系统,并且按照气候特征和降雨统计特性分区分片进行全国降雨频率图集的编制,估算成果作为防洪设计事实上的国家标准在全国推广^[1],供联邦、州、县各级政府公共工程防洪设计和地区防洪规划使用。目前,线性矩法是国际上发达国家普遍采用的频率分析方法,国内的专家学者也在实际资料应用中验证了地区线性矩法的优越性^[2,4]。20世纪90年代后期,国内的陈元

芳、张静怡、陈永勤等^[5-7]对线性矩法和地区分析结合我国的实际资料进行了进一步研究,分别得出了区域适用的分布线型。吴俊梅等^[8]在2011年运用基于水文气象一致区的地区线性矩法对太湖流域进行暴雨频率分析。笔者采用基于水文气象一致性地区分析的雨量频率估算方法,并在全国范围内首次将水文和气象部门的雨量资料统合,分析计算厦门地区降雨频率估计值,并编制暴雨高风险区划图。

1 研究资料与方法

1.1 研究区概况

厦门市地处我国东南沿海,是福建南部金三角的中心地区,主要地形为滨海平原、台地和丘陵,地势西北高东南低;属于海洋性亚热带季风气候,温和多雨,年平均降水量由西北向东南递减,没有冬季。

1.2 研究资料

为充分探知降雨的空间分布情况,本研究选用福建省水文局和厦门市气象局提供的23个雨量站点资料,雨量站点的分布见图1。其中,水文雨量站点共19个,7个在厦门市内;气象雨量站共4个,2个在厦门市内。其余14个雨量站分布在厦门市周围,形成一个“缓冲区”,目的在于提高研究区边缘地带的频率估计值的可靠性,其也是地区线性矩分析法区别于其他水文分区方法的重要特点。



图1 研究区的雨量站点分布

Fig. 1 Distribution of rainfall stations in study area

雨量资料包括1、3、6、12和24 h这5个时段年

最大值降水序列,为保证计算结果的可靠性,并兼顾资料现状,本研究取有效资料长度为20年,对23个站点降水序列进行严格的数据审查,除去1h数据资料序列中存在一个水文雨量站小于20年的资料长度,其他均满足大于20年资料序列的要求。

1.3 研究方法

水文气象途径的地区线性矩频率分析法基于水文和气象学科的交叉融合,第1步是在研究区构造一个水文气象一致区,水文气象一致区不是按照行政区域划分的,一致区内所有站点必须在气候条件上具有相似性以及统计特征的同一性。

1.3.1 不和谐检验

Hosking在进行地区线性矩频率分析时,发现样本线性矩系数可以反映出错误值、奇异值、数据变化趋势以及样本期望的改变等信息^[9]。因此构造了一个新的统计量:不和谐性检验因子 D_i 来检验这种不和谐站点,其定义如下:

$$D_i = \frac{1}{3} N(u_i - \bar{u})^T A^{-1} (u_i - \bar{u}) \quad (1)$$

式中: N 为一致区内的站点数量; u_i 为样本线性矩系数,即 $u_i = [t^{(i)}, t_3^{(i)}, t_4^{(i)}]$; $\bar{u} = N^{-1} \sum_{i=1}^N u_i$; $A = \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})(u_i - \bar{u})^T$ 。当 $D_i \leq (N-1)/3$ 时,认为该一致区内没有奇异点。当 D_i 值超过了临界值时,需要对原始数据的真伪进行检查或者应该考虑移动该站点至相邻另外一个比较“和谐”的区域。研究中发现,如果这个站点的高 D_i 值是由个别极端的局部气象事件所引起的,如特大暴雨洪水,而且邻近又没有合适的分区可以“接收”它,那么不管 D_i 值如何高,仍保留该站点在这个区域,这样对全局来说比较合理。

1.3.2 地区线性矩法

线性矩法为次序统计量的线性组合的期望值,相当于概率权重矩的线性组合。线性矩最大的特点就是:对于序列中极大值和(或)极小值的数据没有那么敏感,表达的仅仅是一阶样本矩各种组合的计算,所以估算过程将更加稳健。1997年Hosking等人应用线性矩对地区洪水频率进行分析,以空间换时间,使得频率估计值的准确性大大提高^[10]。

线性矩假定变量 X 服从某一分布函数, $X_{1:n} \leq X_{2:n} \leq \dots \leq X_{n:n}$ 是容量为 n 的一组随机样本的次序统计量,定义 r 阶线性矩变量如下:

$$\lambda_r = r^{-1} \sum_{k=0}^{r-1} (-1)^k \binom{r-1}{k} EX_{(r-k):r}, r=1,2,\dots,\Lambda \quad (2)$$

式中: $EX_{(r-k):r}$ 是容量为 n 的样本中排在第 $r-k$ 位次序统计量的期望值。

常用的前四阶样本线性矩可以表示为:

$$l_1 = n^{-1} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

$$l_2 = \frac{1}{2} \binom{n}{2}^{-1} \sum_{i=j+1}^n \sum_{j=1}^{n-1} (x_{i:n} - x_{j:n}) \quad (4)$$

$$l_3 = \frac{1}{3} \binom{n}{3}^{-1} \sum_{i=j+1}^n \sum_{j=k+1}^{n-1} \sum_{k=1}^{n-2} (x_{i:n} - 2x_{j:n} + x_{k:n}) \quad (5)$$

$$l_4 = \frac{1}{4} \binom{n}{4}^{-1} \sum_{i=j+1}^n \sum_{j=k+1}^{n-1} \sum_{k=l+1}^{n-2} \sum_{l=1}^{n-3} (x_{i:n} - 3x_{j:n} + 3x_{k:n} - x_{l:n}) \quad (6)$$

为了能比照常规矩中的离差系数(Cv)、偏态系数(Cs)以及峰度系数(Ck)表述样本频率曲线的统计特性,线性矩的统计参数表达如下:样本线性矩离差系数 $L-Cv, t=l_2/l_1$;样本线性矩偏态系数 $L-Cs, t_3=l_3/l_2$;样本线性矩峰度系数 $L-Ck, t_4=l_4/l_2$ 。

地区分析法是假定某一地区各站点降水的共性分量符合水文气象一致区原理,在水文气象一致区内,通过一定的参数估计方法来选配最优的一条无量纲频率分布曲线,然后,再与各站点的个性分量“叠加”推求各个雨量站的降雨频率估计值。可以用以下公式来表达频率估计值 $Q_{T,i,j}$:

$$Q_{T,i,j} = q_{T,i} \times \bar{x}_{i,j} \quad (7)$$

式中: T 为重现期; i 为一致区数量; j 为一致区内站点数量; $q_{T,i}$ 是在重现期为 T 的情况下第 i 个一致区内共性分量的地区频率因子; $\bar{x}_{i,j}$ 为第 i 个一致区内第 j 个站点个性分量的降雨特征,通常为每个雨量站点的多年降雨量平均值,综合反映了该一致区长期以来的气候、降雨特征以及地貌地形。

1.3.3 异质性检验

对线性矩离差系数(L-Cv)采用异质性检验因子 H_1 来判断每个子区域是否为一致性区域^[10],利用一致区内全部数据进行非一致性度量指标 H_1 的计算,公式如下:

$$V_1 = \left\{ \sum_{i=1}^N n_i [t^{(i)} - t^R]^2 / \sum_{i=1}^N n_i \right\}^{1/2} \quad (8)$$

$$t^R = \sum_{i=1}^N n_i t^{(i)} / \sum_{i=1}^N n_i \quad (9)$$

$$H_1 = \frac{V_1 - \mu_V}{\sigma_V} \quad (10)$$

式中: N 为一致区内的站点数量; n_i 为一致区内第 i 个站点的历史降水数据序列长度; $t^{(i)}$ 为一致区内第 i 个站点的历史降水序列的 $L-Cv$; μ_V 和 σ_V 分别是由蒙特卡罗模拟计算出的 V_1 值的均值和均方差。当 $0 \leq H_1 < 1$ 时, 表示划分为一致区可以接受; 当 $1 \leq H_1 < 2$ 时, 表示一致区可能为异质区; 当 $H_1 \geq 2$ 时, 表示一致区为异质区; 当 $H_1 < 0$ 时, 表示一致区内的站点可能存在某种相关性, 需进一步检验。

1.3.4 拟合优度检验方法

水文频率计算包含 3 部分内容: 抽样方法、参数估计、线型选择。线型选择是最后的重要一环, 选择哪种总体分布函数来最佳地拟合实际样本, 其选配的准则判断称为拟合优度检验。

在线型选择的拟合优度判别中, 通常 3 个特征十分重要: 资料的中心趋度、离散程度、偏态程度。目前常用的 3 参数分布曲线在拟合资料时具有相对的灵活性和稳定性, 主要有 5 种: 广义逻辑斯蒂分布 (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 (PE3, P-III)^[1]。本研究选用以下 3 种具有坚实统计基础的检验方法: 蒙特卡罗模拟检验、样本线性矩的均方根误差检验 (RMSE) 以及实测数据检验 (RE), 来确定每一个水文气象一致区能够拟合实测数据的最佳分布曲线。

① 蒙特卡罗模拟检验

此检验方法由 Hosking 和 Wallis 于 1991 年提出, 为一种基于区域降水序列的平均峰度系数的拟合优度检验方法^[10]。在 $(t_3 - t_4)$ 示意图中, 固定线性偏态系数 t_3 的值, 利用纵坐标计算得出的 t_4 (区域平均线性峰度系数) 与 τ_4^{DIST} (分布函数的线性峰度系数) 之间的差异来选择最优曲线, 差异用统计量 Z^{DIST} 表示。当 $|Z^{\text{DIST}}| \leq 1.64$ 时, 则所选的概率函数分布线型是合理、可以接受的; $|Z^{\text{DIST}}|$ 越小, 实际数据与模拟结果拟合得越好。之所以选取 1.64 这个值, 是借用误差正态分布中正负一个均方差范围的置信区间。

② 样本线性矩的均方根误差检验

由于使用蒙特卡罗模拟检验无法避免单纯使用统计参数均值所带来的一系列误差, Lin 等人于 1996

年考虑了一致区内所有站点降雨数据的峰度系数, 在此基础上提出了一种拟合优度检验方法^[11], 将一致区内所有站点的统计参数都考虑进去, 即样本线性矩的均方根误差检验方法。该方法利用实测样本计算所得的 $L-Cs$ 和 $L-Ck$ 与所挑选线型的 $L-Cs$ 和 $L-Ck$ 的偏差值 (用 RMSE 表示) 进行拟合优度检验。RMSE 值越小, 说明样本和所选的分布函数曲线拟合就越好, 为合理、可接受的最优线型。

③ 实测数据检验

Lin 等人于 1996 年提出了基于一致区内降雨序列的经验频率与对应的理论概率接近程度的检验方法, 称为“Real Data Check”^[11]。该方法利用一致区内第 i 个站点的实测降水序列计算分位点估计值的经验超过频率, 与相应的理论概率比较作为拟合优度检验的标准, 用经验频率与理论概率的相对误差 RE 来表示。RE 绝对值越小, 则说明数据与分布线型拟合程度越好。但需要注意的是, 样本的多少以及计算的重现期长短对 RE 值是有影响的, 若样本量很小则 RE 值会失去统计意义, 这种情况下重现期 > 100 年时经验频率很不稳定, 所以在地区分析法中重现期 < 100 年时 RE 值是适用的, 这一点与本研究资料现状相符合。

2 结果与分析

2.1 水文与气象雨量数据一致性检验

水文频率计算中最重要的基础性工作是数据的质量控制, 本研究对于水文站与气象站雨量数据是否同分布以及分区内不同雨量站数据系列之间是否相互独立, 需要在计算之前进行数据一致性审查和检验。为此, 选取 5 组距离较近的水文和气象雨量站组合 (晋江 - 磁灶、同安 - 五丰、同安 - 造水、同安 - 汀溪水库、同安 - 汪前), 利用 t 检验法 ($\alpha = 0.05$) 检验水文站与气象站降水序列在统计上的一致性。结果表明, 水文与气象数据大部分满足 5% 显著性水平下的同分布, 其中, 同安站与造水站 6、12 和 24 h 的数据以及同安站与汪前站 12 和 24 h 的数据未通过 t 检验, 分析原因可能是水文和气象雨量站观测数据之间存在某种观测误差或者目前观测的降水序列长度不够, 存在抽样误差, 这些可以等时间序列稍长一些再进一步检验。

同时, 随机挑选两组水文站点的雨量数据, 进行随机性检验, 本研究采用非参数的游程检验, 根据检验标准, 双侧渐近显著性 > 0.05 即为随机性显著。

结果表明,厦门市水文站点雨量资料的独立性良好。

2.2 水文气象一致区的划分

水文气象一致区的划分和构造是地区线性矩频率分析法中很重要的环节。选取资料有效长度 > 20 年的站点进行分区研究,划分厦门市不同时段(1、3、6、12、24 h)的水文气象一致区,对所选中的 19 个水文站点和 4 个气象站点的水文观测资料进行基本的数据质量审查,进一步对研究区域及其缓冲区进行水文气象一致区的划分。

① 气象相似性的判定

水文气象一致区要满足气象上的水汽入流、成因背景一致,即在极值降雨特性方面一致区内的每个站点都要满足形成暴雨的天气背景相似性条件。在本研究中,厦门及其缓冲区在暴雨的气象成因方面满足相似性的要求,可以大致划为一个一致区。

② 水文相似性判定

在水文上,划分的一致区内站点的共性分量要满足同分布,由于抽样误差的存在,只能要求在一定的容忍度内每一个站点的线性矩统计参数($L - C_v$ 、 $L - C_s$ 和 $L - C_k$)一致。目前的一些研究表明: $L - C_s$ 和 $L - C_k$ 之间相关性很好。因此,只需要对 $L - C_v$ 和 $L - C_s$ 进行判别。首先将厦门及其周围缓冲区划分为一个一致区,对全部数据进行非一致性度量指标 H_1 的计算。当一致区通过了异质性检验之后,接下来检验一致区内 $L - C_s$ 的和谐性。比较一致区内 $L - C_s$ 的特大值和特小值与平均值的差异程度,结合比较相应站点系列最大值的经验频率与 100 年一遇或 1 000 年一遇出现的合理性。

③ 样本独立性检验

当一致区通过了 $L - C_v$ 和 $L - C_s$ 的检验后,如果 $H_1 < 0$,表明站点降水序列可能存在不同程度的相关性,特别是在 $H_1 < -1$ 时,说明某些站点降水序列间存在较强的相关性,需要采取“去相关化”操作来保证样本间在时间和空间上的独立性^[11]。

④ 不和谐性检验

当一致区经过前几步初步划分好时,需要采用不和谐性检验检查区域中是否存在与整个区域不和谐的站点,即统计特性突出的站点,对一致区内的站点降水数据进行调整,直到取得最优的结果。

基于以上的分区方法,基本确定将厦门及其缓冲区 23 个站点划分为一个一致区,对其进行统计参数 $L - C_v$ 和 $L - C_s$ 计算。以厦门及其周围缓冲区

23 个站点 6 h 降雨历时为例,计算得到 $L - C_v$ 值在 0.141 ~ 0.263 之间, $L - C_s$ 值在 0.045 ~ 0.399 之间,可以看出,每个站点计算出的统计参数值并没有相差很大,因此可以考虑将厦门及周围缓冲区划分为一个区。

对 23 个站点的数据进行异质性检验以及不和谐性检验,计算结果表明,在不和谐性检验过程中,1 h 的枋洋站与 6 h 的厦门站的 D_i 值分别达到了 4.82 和 3.15,均超过了临界值 3。经查证实际数据资料,证实枋洋站在 2006 年 7 月 15 日由于“碧利斯”台风经过厦门,带来了一场强台风暴雨;厦门站按照分钟雨量重新计算后,证实这次的降雨量是真实值。由于一致区内站点数量越多,计算结果精度就更高,而如果这两个站单独分区来计算则站点数量太少,而且资料序列也不够长,所以考虑保留这两个站在一致区内。6、12 和 24 h 的 H_1 值 < 0,表明降水序列中有可能存在相关性,挑选最小值 12 h 的降水序列进行样本独立性检验,即对距离 < 30 km 的站点进行相关系数(ρ)计算,当 $|\rho| < 0.7$ 时证明站点之间并不存在相关性。经计算验证,挑选出的 111 对站点中并不存在 $|\rho| > 0.7$ 的情况,即站点数据之间相互独立。经过各种分析准则的分析,将 1、3、6、12 和 24 h 这 5 个时段的站点降水数据都划分为一个水文气象一致区。

2.3 选择一致区内频率分布线型

根据 1.3.4 节提到的 3 种拟合优度检验方法,选配一致区内各时段的最优分布线型。以 6 h 为例,3 种方法的计算结果见表 1。

表 1 厦门及其周围缓冲区在 6 h 时段下 3 种拟合优度检验方法的计算结果

Tab. 1 Results of three goodness-of-fit methods over rainfall data in Xiamen and surrounding buffer zone at 6 h time interval

项 目	分布线型	数值
Z^{DIST}	GLO	1.130
	GEV	-1.010
	GNO	-1.930
	GPA	-6.240
	PE3	-3.610
RMSE	GLO	0.067
	GEV	0.055
	GNO	0.064
	GPA	0.097
	PE3	0.085

续表1(Continued)

项 目	分布线型	数值
RE	GLO	14.500
	GEV	16.500
	GNO	17.000
	GPA	9.500
	PE3	17.500

由表1可知,GLO和GEV的 $|Z^{\text{DIST}}| < 1.64$,满足条件,通过了蒙特卡罗模拟检验,其中GEV的 $|Z^{\text{DIST}}|$ 最小;在样本线性矩的均方根误差检验中,GEV的计算结果最小,其次是GNO;在实测数据检验中,PE3的RE绝对值最高,其次是GNO和GEV。综合考虑3种拟合优度检验方法的计算结果,选择GEV分布线型为该一致区内最优分布线型。同理得出,1、3、12和24 h的最优分布线型分别为GNO、GEV、GEV和GEV分布线型。

2.4 一致区内暴雨频率估计值的计算

根据地区分析法,理论上重现期长的暴雨频率估计值要大于重现期短的,长历时的暴雨频率估计值要大于短历时的。由于实际时段雨量资料的错误或代表性欠缺以及每个时段的适线是各自独立进行,有可能计算结果中出现此类错误,这时就需要对其进行时间一致性调整。经调整计算,厦门及其周围缓冲区23个雨量站点的暴雨频率估计值没有出现重合或交叉现象,都通过了时间一致性的检验。

由于暴雨频率估计值的不确定性,本研究首次提供暴雨频率估计值的置信区间,这里展示的是暴雨频率估计值90%的置信上下限,同时对上下限进行时间一致性调整。以晋江站为例,计算结果见图2,展示了5个时段的置信上下限。

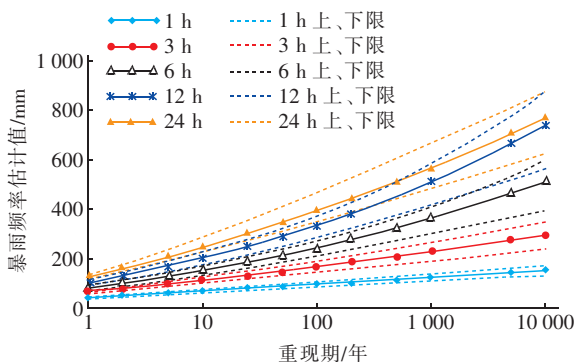


图2 晋江站不同时段90%置信区间的频率估计值曲线

Fig.2 90% confidence interval for different durations at Jinjiang station

从图2可以看出,暴雨频率估计值在上下限中间,而且随着降雨时段的增长,下限随重现期的增加而发散,上限随重现期的增加而呈收敛趋势。暴雨频率估计值的置信区间显示了估计值的随机特性,可为洪涝风险分析提供科学的基础。

3 数字化降雨频率图集与暴雨高风险区划

3.1 降雨频率估算成果的数字化展示

暴雨高风险区划定义: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。至今,设计暴雨的空间分布只涉及到点面关系,即暴雨中心雨量与不同面积平均降雨量的关系,尚无法反映一个地区暴雨最大雨强的空间分布。南京信息工程大学应用水文气象研究院提出了暴雨高风险区划,这一概念及其应用是地区线性矩频率分析方法与计算机技术和网络技术相结合的产物,反过来又促进了降雨频率计算数字化展示和暴雨高风险区划网络可视化的实现,为涉水行业相关工程和非工程措施的布局、规划、设计,以及洪涝预警和气象风险预警平台的建设开辟了广阔的前景。

采用克里金空间插值方法,对厦门及其周围缓冲区23个站点计算得到的频率估计值进行空间内插,可得到整个厦门地区5个时段不同重现期下的降雨频率估计值空间分布图,结合利用网络上的百度地图,编制厦门地区暴雨频率分析成果展示的在线查询平台。以长泰站为例,降雨频率图集数字化成果如图3所示,点击底部选项可以查看不同时段90%的置信上下限。

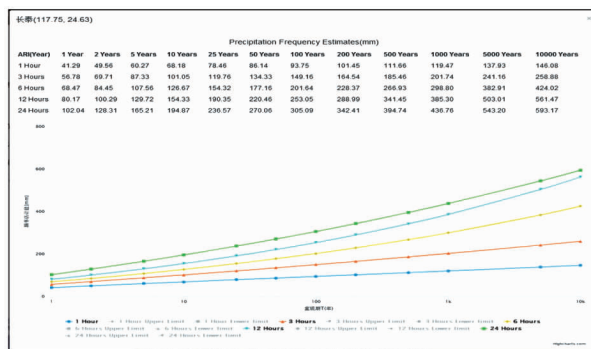


图3 平台界面下长泰站不同时段不同重现期下的暴雨频率估计值数字化显示

Fig.3 Digitization of quantiles for different durations and return periods at Changtai station in Xiamen

厦门地区6 h时段下50年一遇和100年一遇的暴雨高风险区划如图4所示。可以看出,暴雨频

率估计值随重现期的增加而增大;降水量级从东北向西南递减,不同重现期下的降雨强度最大值均出现在厦门的东北部、最小值分布在西南部,反映了厦门市历史降雨的实际情况。根据实际资料考证,在厦门的西北角也可能存在一个暴雨高风险区,但是由于该地区站点只有一个站并且资料序列也不够长,尚无法清晰地显现出来。这一分析结果将对该地区雨量站的增设起到指导作用,同时也能对以后的防洪决策提供科学基础。

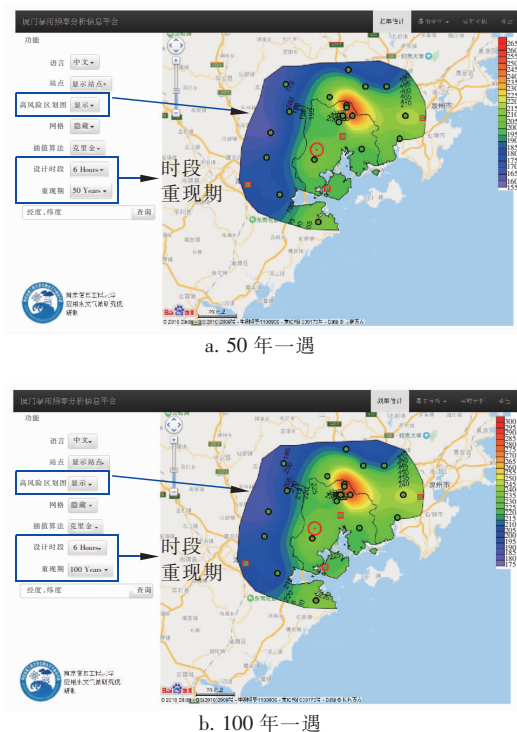


图 4 厦门市 6 h 时段不同重现期下的暴雨高风险区划

Fig. 4 Rainstorm high-risk regionalization for 6 h at different return periods in Xiamen

3.2 人机对话的暴雨高风险区划可视化应用

利用大数据云存储功能,本平台应用网络可视化的方式进行展示,人机互动,极大地提高了纠错、改正和添加数据的效率。该平台功能全面,用户可以通过鼠标点击和拖拽查看研究区内任意地点在对应的设计时段的降水频率估计值;可以查看任意点降水频率估计值的图表及计算数据(如图 5 所示);也可以直接输入对应的经纬度查询对应的图表和数据;可以根据不同的插值方法查看短历时暴雨高风险区划图等(如图 4 所示)。暴雨高风险区划指导了地区防洪规划、城市设计暴雨估算、城市内涝防治规划、工程建设规划设计等领域的工作,此网络可视

化平台反映了设计暴雨研究和应用的最新水平。同时该平台也可以实现数据的实时更新。

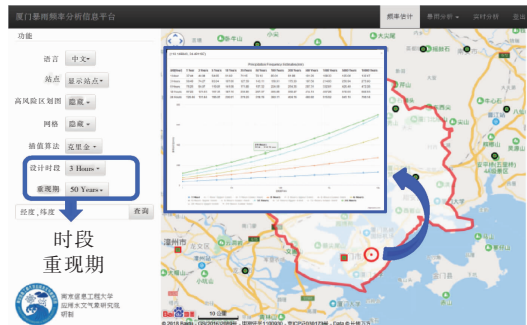


图 5 平台界面下厦门市降雨频率图集可视化操作

Fig. 5 Visualization platform of precipitation frequency atlas of Xiamen

4 结论

① 在地区线性矩基础上首次统合气象站与水文站雨量资料,采用一致性检验判断气象与水文雨量资料在统计上是否为同分布。计算结果表明,厦门地区气象与水文雨量资料除去个别时段大部分属于同分布。分析个别不一致站点的原因,可能是因为观测数据存在某种观测误差或者观测的降水序列长度不够长,建议在序列长度增加后进一步验证。

② 依据水文气象途径的分区判别准则,将厦门及其周围缓冲区划分为一个一致区,根据 3 种拟合优度检验方法得到一致区内 5 个时段(1、3、6、12 和 24 h)的最优分布分别为:GNO、GEV、GEV、GEV、GEV。利用地区分析法得到 23 个站点各个时段不同重现期下的暴雨频率估计值,并插值得到其空间分布。由计算结果可知,厦门市暴雨高风险区在东北部,根据实际资料考证得知在西北角可能存在另一个高风险区,但因为站点数量过少以及资料序列长度的问题,计算结果中并未显示,需要在该处增设适当的雨量站以获取比较全面的空间实测资料,得到更好的降雨空间分布结果。

③ 首次提供对暴雨频率估计值计算 90% 的置信区间并进行时间一致性调整,计算结果符合理论分布,并考虑到了暴雨频率估计值的不确定性,这可为工程设计、地区洪涝规划和预警的风险分析提供科学的建议。

④ 本研究研制的基于网络的含有人机对话功能的降雨频率图集和暴雨高风险区划图集可视化平台,利用大数据云存储功能,使计算成果可以进行实

时网络传输,节省了人力、物力和成本,可快速查询暴雨量级以及暴雨的高风险区,为该地区海绵城市建设的顶层设计、城市防洪排涝规划提供科学的基础;同时,为开发全国范围的时空全覆盖的降雨频率图集云计算(存储)积累了经验;暴雨高风险区划图集的研制也为防洪减灾以及暴雨灾害气象风险预警平台的研制提供了理论和技术支撑。

参考文献:

- [1] 林炳章. 水文气象分区线性矩法规范防洪设计标准的研究和应用[A]. 中国水利学会2010学术年会论文集[C]. 郑州:黄河水利出版社,2010.
Lin Bingzhang. Research and application of hydrometeorological regional L-moment in flood control design standards [A]. Proceedings of 2010 CHES Annual Conference [C]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2010 (in Chinese).
- [2] 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]. 2012中国水文学术讨论会论文集[C]. 南京:河海大学出版社,2012.
Lin Bingzhang, Shao Yuehong, Yan Guixia, et al. Development of hydrometeorology in promoting research on the core project of engineering hydrological calculation [A]. Proceedings of 2012 Chinese Symposium on Hydrology [C]. Nanjing: Hohai University Press, 2012 (in Chinese).
- [3] 任伯帜,许仕荣,王涛. 皮尔逊-Ⅲ型分布统计参数的确定[J]. 中国给水排水,2001,17(1):40-42.
Ren Bozhi, Xu Shirong, Wang Tao. Determination of Pearson-Ⅲ distribution statistical parameters[J]. China Water & Wastewater, 2001, 17(1): 40-42 (in Chinese).
- [4] Lin B, Vogel J L. A comparison of L-moments with method of moments[A]. Engineering Hydrology: Proceedings of the Symposium [C]. New York: American Society of Civil Engineers, 1993.
- [5] 陈元芳,沙志贵,顾圣华,等. 可考虑历史洪水对数正态分布线性矩法的研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2003,31(1):80-83.
Chen Yuanfang, Sha Zhigui, Gu Shenghua, et al. Study on L-moment estimation method with consideration of historical floods for log-normal distribution[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2003, 31(1): 80-83 (in Chinese).
- [6] 张静怡,徐小明. 极值分布和P-Ⅲ型分布线性矩法在区域洪水频率分析中的检验[J]. 水文,2002,22(6):36-38.
Zhang Jingyi, Xu Xiaoming. Test on L-moment estimation method for GEV and P-Ⅲ distribution in region flood frequency analysis [J]. Journal of China Hydrology, 2002, 22(6): 36-38 (in Chinese).
- [7] 陈永勤,黄国如. 基于线性矩法的东江流域区域枯水频率分析[J]. 应用基础与工程科学学报,2005,13(4):409-416.
Chen Yongqin, Huang Guoru. Regional low flood frequency calculation with L-moments method at Dongjiang Basin [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2005, 13(4): 409-416 (in Chinese).
- [8] 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-moment analysis method in precipitation frequency analysis for Taihu Lake Basin [J]. Journal of China Hydrology, 2015, 35(5): 15-22 (in Chinese).
- [9] Hosking J R M. L-moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics [J]. J R Statist Soc B, 1990, 52(1): 105-124.
- [10] Hosking J R M, Wallis J R. Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-moments [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [11] Lin B, 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 [A]. EWRI Proceedings [C]. Omaha: ASCE-EWRI, 2006.



作者简介:商慧(1993-),女,山东聊城人,硕士研究生,研究方向为水文气象。

E-mail: sh5261826773@163.com

收稿日期:2018-08-13