

英国设计洪水研究进展

徐长江¹, 郭生练², 熊立华², 周 芬²

(1. 长江水利委员会水文局, 湖北 武汉 430010; 2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要:介绍了英国设计洪水研究在降雨频率分析、采用耿贝尔分布由流量资料推求设计洪水、利用单位线和损失模型由雨量资料推求设计洪水这三个方面的最新方法, 通过分析对比 FSR 和 FEH 中的内容, 归纳总结了英国近 20 多年来设计洪水的研究进展。

关键词:设计洪水; 降雨频率分析; 耿贝尔分布; 单位线和损失模型; 英国

中图分类号:TV122+.3

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2004)02-0066-03

英国具有丰富的暴雨洪水资料, 并一直对设计洪水做着长期持续的研究工作。1975 年, NERC (Natural Environment Research Council) 出版了《Flood Study Report》(简称为 FSR) 洪水研究报告丛书^[1]。该报告给出了设计洪水和可能最大洪水的估算方法, 在英国、爱尔兰等欧洲国家和许多非洲国家得到了广泛应用, 并在国际上产生了巨大影响。

FSR 出版至今已有 20 多年, 随着时间的推移, 防护区社会经济的迅速发展, 对设计洪水成果的最新要求, 水文资料的积累和丰富, 原有方法的改进和完善, 新方法的提出和应用等, 都强化了进一步研究设计洪水的必要性。在英国有关部委的支持下, 英国水文研究所从 1994 年开始修订设计洪水计算方法, 历时 5 年, 于 1999 年正式出版了洪水估算手册《Flood Estimation Handbook》(简称为 FEH)^[2]。FEH 在很大程度上都超越和取代了 FSR 和它的补充报告, 主要就设计洪水计算方法的选择、估值的选用、降雨频率估算、用概率统计法进行洪水频率分析、FSR 降雨径流关系法的介绍和应用、流域特征变量的定义和提取等方面进行了详尽的阐述。

1 降雨频率分析

降雨频率分析可基于年最大系列(AM)进行。在 FEH 中, 采用从各水文年中提取各种历时的年最大降雨量组成的 AM 系列进行降雨频率分析。降雨频率分析包括降雨统计参数计算和降雨增长曲线推导两个主要内容。

1.1 降雨指标变量 P_T

在 FEH 中, 降雨指标变量 P_T 是指某一站点年最大降雨量系列的中值, 相当于 2 年一遇的雨深值,

而不再采用 FSR 中的 5 年一遇雨深值作为指标变量。中值不受 AM 系列中出现的异常特大或特小的降雨量值的影响, 因此它是一个更为稳定的统计变量。在降雨资料丰富的地区, 可以直接根据雨量资料求得 P_T ; 在资料缺乏或无资料地区, FEH 用地理回归分析法推求 P_T 。

1.2 推求增长曲线

实践表明用 FSR 中方法得到的结果过于概化, 不能揭示降雨频率中重要的局部变化和区域变化, 且经研究证实, 在一些地区会明显地低估或高估设计降雨值。为了克服由降雨增长因子所引发的这些问题, FEH 采用 FORGEX (Focused Rainfall Growth Curve Extension) 法^[3]推求降雨增长曲线。FORGEX 是一种经验性的地理分析方法, 先点绘经验点据, 然后通过这些点适线。本质上, 降雨增长曲线不可能服从任何特定的频率分布, 所以采用 FORGEX 法分析的目的也只是让曲线尽可能与大部分点据拟合。降雨增长曲线在耿贝尔分布下是由几个线性的线段首尾相连而成, 增长曲线按最小平方差原则适线, 采用线性矩法和极大似然法来估计其分布参数。

FORGEX 是基于年最大系列的分析方法, 其主要特点如下: 将测站的年最大雨量中值 P_T 作为一个统计量, 对各个降雨历时分别推求其增长曲线; 增长曲线主要针对我们感兴趣的地方, 而不是对一个固定区域; 增长曲线可以推求较长重现期的降雨; 增长曲线由多段首尾相连的线段连接而成, 横轴是耿贝尔标准化变量。

1.3 建立雨深-历时-频率(DDF)模型

绘制了 P_T 值的分布图和推导了增长曲线后, 就可以建立 DDF 模型。DDF 模型的形式如图 1 所示, 该

图中有两条独立的雨深-历时关系曲线,足以说明雨深-历时与频率的关系.斜率(线段)的转折点在历时为12h和48h处,之所以选择在这两个时间点处斜率发生变化,是气象和经验原因得出的结果.雨深随历时增加可以用三条首尾相连的线段表示,每条线段的斜率分别为 $a_1(y)$, $a_2(y)$, $a_3(y)$,线段在 y 轴上的截距用 $b(y)$ 表示.雨深-历时曲线的位置随重现期变化,重现期仍用耿贝尔变量 y 来表示.

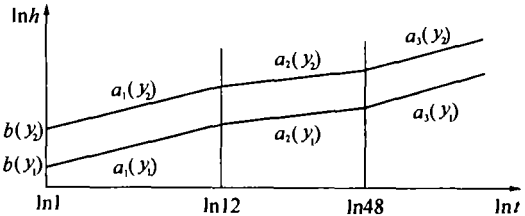


图1 雨深-历时-频率曲线

英国每一站点的DDF模型中都有所有特征历时(1h,2h,6h,12h和1d,2d,4d,8d)的降雨频率关系和所有特征重现期(2a,5a,10a,20a,50a,100a,500a,1000a)的降雨历时关系.所有适线都采用最小平方误差准则.事实上,洪水设计中需要的是设计面雨量,这就必然涉及到点面折减系数 f .FEH中没有涉及 f 的研究,而是继续采用FSR中关于 f 的研究结果.

DDF曲线适用于计算降雨历时从1h到8d和重现期长至1000a的设计暴雨值.DDF曲线不能用于推求重现期更长的设计暴雨,这样可能会在估算不同历时的设计暴雨时出现一些矛盾的现象.

2 洪水频率分析

2.1 指标洪水 Q_{Φ}

指标洪水表示期望在某一点出现的典型洪水强度.FSR采用AM系列的均值 Q_{Φ} ,而FEH采用更为稳定的中值 Q_{Φ} 作为指标洪水.

2.2 分布线型选择

在选择分布时,期望选择一个参数较少但拟合能力较强的分布.FSR采用GEV(Generalised Extreme Value)分布,而FEH建议使用GL(Generalised Logistic)分布来做洪水频率分析.GL分布的一个优势在于,当线性矩偏态系数取正时,它没有上限约束.一般情况下,洪水频率分布有一个接近于最大观测值的上限是不大现实的.而其他一些常见的分布,诸如GEV分布,在英国相当大一部分流域的应用中都存在上限约束问题.

GL分布函数为

$$Q(F) = \xi + \frac{\alpha}{k} \left[1 - \left(\frac{1-F}{F} \right)^k \right] \quad (k \neq 0) \quad (1)$$

它是一个3参数分布,其中, ξ 为位置参数; α 为尺度参数; k 为形状参数; F 为不超过概率.在特殊情况下, $k=0$ 时,GL分布简化为2参数L-分布.

将 $x=Q/\xi$ 代入式(1),重新整理,即可由洪水频率曲线得到GL累积曲线:

$$x(F) = 1 + \frac{\alpha}{\xi k} \left[1 - \left(\frac{1-F}{F} \right)^k \right] \quad (k \neq 0) \quad (2)$$

式中: $x(F)$ 为不超过概率 F 下的增长因子;其余符号意义同前.

给定重现期的设计洪水可由下式计算:

$$Q_T = Q_{\Phi} x_T \quad (3)$$

式中: x_T 为重现期的增长因子.

在由数据样本估算概率分布参数时,L-矩法由于其对极大值或极小值都有较好的稳健性而受到推崇^[4].常见的参数估计方法有矩法、最大似然法和L-矩法,其中FSR采用矩法.矩法比较适合对称分布情况,当数据呈现偏态性时,由于样本偏态估值可靠性不佳,由矩法估计的结果偏差较大,而许多洪水系列都有较强的偏态性,因而建议使用L-矩法为佳.最大似然法在计算中比较灵活,但涉及复杂方程求解或数字优化问题,在搜索最大值时,常会出现一些数值问题而得不到解.实践表明,L-矩法在中小尺度样本的洪水估算问题中,给出的结果并不逊于最大似然法.

2.3 洪水频率计算结果修正

a. 城市化修正.城市化对一个流域的洪水行为有着明显的影响.典型情况是,它加速和强化了洪水响应,并拓宽了洪水发生的季节分布.FEH推荐的方法是,先将该流域视作天然流域,进行洪水频率估算,继而对其做城市化修正.

b. 对透水性流域作修正.透水性流域会导致在年最大洪水系列中,一些年份的年最大洪水仅由基流构成,从而给洪水频率估算带来一些问题,并导致得到的频率曲线不尽合理.在FEH中,建议对所有的透水性流域都做透水性修正.

c. 气候修正.英国年际间的气候差异很大.这种差异的一个很重要的方面就是,它会导致丰水年组和枯水年组的交替出现.这种差异意味着,由较短资料估算的 Q_{Φ} ,并不具有对较长时期的代表性,这时,就要将合适的长期资料站点的信息移置到短期资料站点,对其做出修正.

2.4 设计过程线

严格意义上说,没有所谓的多少年一遇设计洪水过程线,所有的洪水过程都是不同的,频率只能被赋予设计过程线的某一特定方面,诸如它的洪峰,或最大一日洪量.FEH只是提供了一种勉强满足要求的途径,即给出的过程线的洪峰达到设计频率的要求.常用的得到设计过程线的方法有三种:①不断改变降雨-径流模型的参数,直到由降雨-径流法得到的洪水频率曲线与由统计分析法得到的洪水频率曲线相一致,则可由降雨-径流法给出设计过程线;②由FSR降雨-径流法借鉴标准洪水过程线形状;③对有资料点,可

以对其最大洪水的过程线进行直接分析.在应用中,可以取其上半部分的特征来概化设计过程线.

3 由雨量资料推求设计洪水

a. 单位线和损失模型.单位线和损失模型是FSR研究流域降雨-径流关系的主要工具,FEH仍采用了该方法.单位线采用一个简单三角形形状,单位线的顶点流量(也即最大流量)和时间基长都是峰现时间的函数.径流百分比是指净雨与总降雨之比,即变成河流中的快速响应径流的那部分降雨在总降雨中所占的比例.基流代表在降雨及该次降雨所导致的慢速响应径流开始之前河流中的流量.峰现时间、径流百分比和基流为该模型的3个参数.

b. 单位线和损失模型的参数估计.常见的用来估计模型参数的方法由优到次为:①通过分析当地观测到的洪水事件资料来直接估计模型参数;②通过分析当地观测到的水文气象资料来间接估计模型参数;③根据流域特征因子来估计模型参数;④移用邻近有资料地区的信息来估计模型参数.

c. 设计暴雨.用FSR降雨径流关系法估计给定重现期的洪峰,即设计洪水,就是将合适的设计暴雨输入到FSR单位线和损失模型中去.这种方法所需要的4个设计变量是:降雨历时、降雨深(或重现期)、降雨时程分布(或雨型)和前期流域湿度.

d. 设计洪水.由设计暴雨和前期流域湿度推求设计洪水的步骤如下:①估计FSR单位线峰现时间、径流百分比和基流,从而完全确定FSR单位线和损失模型;②根据径流百分比从总降雨过程线中导出净雨过程线;③对净雨过程和FSR单位线进行卷积运算求出快速响应径流过程线;④将基流加到快速响应径流过程线得到总流量过程线.

e. 可能最大洪水.FSR用来估计可能最大洪水(PMF)的降雨径流关系法就是将可能最大暴雨(PMP)输入到FSR单位线和损失模型中进行计算.前面已经描述了用来估计FSR单位线和损失模型3个参数的一些方法,在估计可能最大洪水时,这些参数估计方法所得到的结果被当作初始结果,在适当的情况下,这些初始结果需要进行重大修正.

设计暴雨历时的计算方法同前述设计洪水中设计暴雨历时的推算方法,但给定设计暴雨历时后,PMP设计暴雨过程线的推求方法不再是先求雨深然后根据选定雨型来分配,而是根据各种地图和表来确定.此时,根据实际情况,还要考虑融雪对暴雨深的贡献.可能最大洪水PMF推导的步骤和前述的设计洪水推求方法基本一致.

f. 连续模拟法.降雨-径流连续模拟能够连续地模拟流域的水量平衡^[5].有了这种模型,就可计算

整个流量过程线,这样,基流分割就不再有任何问题.同时,在暴雨间歇期仍然可以继续土壤含水量计算,从而避免了土壤前期含水量问题.虽然可以采用模拟的连续流量过程线来进行洪水频率分析,但还是有很多重大问题需要解决,比如连续输入的代表方法、模型参数的确定以及区域综合等.

4 流域特征值

FSR详细论述了如何由流域特征值估计设计洪水的方法.流域特征值过去由手工计算方法从军用地图中得到,非常费时,且需要一定的经验来准确界定流域边界.随着科学技术突飞猛进的发展,人们已开始运用数字高程模型提取数字河流信息来正定位河谷和流域边界.

从以前由军用地图发展到今天由IHDTM(Institute of Hydrology Digital Terrain Model)得到流域特征值,这里体现的不仅仅是自动化的优势.当借助地图来计算时,需要手工完成,所以要求计算简单明了,一旦摆脱了这个束缚,数字数据组的运用可使流域的描述具有更大的灵活性和微妙性.例如,城市化指数可以细微地考虑在居民区内划出郊区面积大小,定出流域内组合面积相对于测站的位置等.脱离了计算和专用图的限制,FEH可以更好更多地考虑在FSR中不能获取或获取较为困难的流域特征值.

5 结 语

自FSR问世以来的20多年中,理论研究和实践应用反馈信息相互作用,进一步加深了对设计洪水这一问题的全面认识,也进一步改进和提高了原有的方法.从GEV分布到GL分布,从矩法到线性矩法,从设计事件法到连续模拟法,从手工计算到利用IHDTM计算流域特征值等,反映了英国和世界设计洪水研究正在不断发展和进步,值得我们学习和借鉴.

参考文献:

- [1] NERC. Flood studies report[M]. London: Natural Environment Research Council, 1975.
- [2] IH. Flood estimation handbook[M]. Wallingford: Institute of Hydrology, 1999.
- [3] Faulkner D S, Jones D A. The FORGEX method of rainfall frequency estimation performance[J]. Hydrol and Earth System Sci, 1999(3): 205 ~ 212.
- [4] Hosking J R M, Wallis J R. Regional frequency analysis: an approach based on L-moments[M]. London: Cambridge University Press, 1997.
- [5] Calver A, Lamb R. Flood frequency estimation using continuous rainfall-runoff modeling[J]. Phys Chem Earth, 1996, 20: 479 ~ 483.

(收稿日期: 2003-07-02 编辑: 熊水斌)