

数字流域与雨量站网论证技术的集成应用研究

李春红, 王建平, 陈 建, 谢小燕

(国网电力科学研究院南京南瑞集团公司, 江苏 南京 210003)

摘 要:针对传统站网论证方法难以与降雨分布的影响因素相关的局限性,将数字流域引入站网论证方法中,阐述了数字流域建设和信息提取的相关技术,并将数字流域与站网密度、相关分析、雨量等值线、历史洪水预报分析4种站网论证技术进行集成和应用研究。研究表明,数字流域与雨量站网论证技术的集成考虑了地形等因素影响,论证结果更合理,其基本思想可为类似的站网论证分析提供借鉴。

关键词:站网论证;洪水预报;数字流域;等雨量线

中图分类号:TV212

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2013)06-0058-05

1 前言

一个先进的水情测报系统,测站的合理布设是其关键技术之一,它不仅关系到系统建设的规模和投资,而且也涉及到系统设备的运行和维护,更与系统日常运行中洪水预报的精度密切相关^[1]。

已有的站网论证通常从数学的角度出发,进行站网的密度、相关性或抽站试验等分析,很少涉及与降雨量存在物理联系的地形、气象等特征。实际上,雨量站的代表性与其所处位置及周边区域的地理特性都密切相关,地形是影响降雨量的重要因素。如何在雨量站网布设时,将其与流域地形相关联,有效地增加站网布设的合理性是站网规划论证技术发展的新方向。

数字流域用数字化的手段刻画整个流域,以覆盖全流域的整体模型作为基础,处理大量的流域信息,服务于流域管理实践^[2]。近年来,数字流域广泛应用于水文预报、调度、风险分析等领域,为水文提供了广阔的发展空间。本文将流域地形信息引入雨量站网论证领域,将数字流域与站网论证技术集成,研究物理意义支撑下的站网论证技术。

2 数字流域相关技术简介

数字流域的建设,数据是基础,模型是核心,应用

是目标^[2]。

目前应用较多的数据主要为栅格形式的数字高程模型数据(Digital Elevation Model,缩写为DEM)或矢量的地形数据,已免费发布的全局1:25万地形图和100m×100m的格网DEM数据。

数字流域模型主要实现流域信息的数字化提取和数字化显示。目前,利用数字高程数据模拟流域地形、水系、集水面积、坡度等的方法很多,由Martz和Garbrecht(1992)研制的数字高程流域水系模型(Digital Elevation Drainage Network Model,缩写为DEDNM);美国RSI(Research System Inc.)公司的RiverTools软件;美国环境系统研究所ESRI开发的Arcview、Arc/Info软件等都可以方便的实现流域信息的数字化提取和显示^[3]。

流域信息提取的一般步骤:

(1)DEM预处理。在DEM离散化过程中的插值误差和采样误差,造成许多洼地,这些洼地将在水流方向计算时,造成有些水不能流出流域边界,从而产生很大的误差或不能计算出合理的结果。水文特征信息的提取需要高质量的DEM,要求没有坑和坝,这就要预处理,即对原始的DEM进行填洼处理,得到无洼的DEM。

(2)计算水流方向矩阵。对处理后的DEM按照某

收稿日期:2012-01-30

基金项目:江苏省自然科学基金(BK2011138)

作者简介:李春红(1978-),女,黑龙江同江人,高工,硕士,主要从事水文预报相关研究。E-mail:lichunhong@sgepri.sgcc.com.cn

种算法计算水流的路径及方向,得到一个与 DEM 维数相同的水流方向矩阵。通常采用 D8 流向方法。

(3)计算集水面积。根据水流方向矩阵,计算每一网格的集水面积,得到一个与 DEM 维数相同的集水面积矩阵。

(4)生成水系。根据集水面积矩阵,设置给养面积阈值,大于这个值的认为是河道,从而在集水面积矩阵上标注出河道的位置,这样就生成了栅格形式的河网,经过矢量化,即可得到水系。

(5)子流域、单元划分。生成水系后,编码系统自动编码,确定 Horton—Strahler 级数,而后通过搜寻每一格网所在位置,判断该格网位于河段内、水道左侧或右侧,从而获得每一级河段上游、左右岸集水面积及河道本身面积值,相加得此河段对应单元。

3 数字流域与站网论证技术的集成应用

已有的站网论证技术是水文工作者大量实践和智慧的结晶,将其与数字流域集成,可在保留原技术优势的基础上增强物理意义,使站网布设更趋合理。以下针对站网论证中的 4 种技术与数字流域进行集成应用研究。

3.1 数字流域与站网密度分析集成应用

已有的站网密度分析通常针对全流域或相邻水文站区间进行,这仅仅保证了整个区域上雨量站数目的合理,难以判别其分布的合理性。

数字流域模型可依据水系、集水面积阈值将流域或水文区间分为若干单元,此单元已考虑了地形的影响,水系间的分水岭通常作为单元的边界,不同单元的降水特性往往存在差别。因此,在单元内进行雨量站密度分析可在一定程度上反映测站数目和测站分布的合理性。

如 S 流域面积为 2 443 km²,流域内共布设有 5 个雨量站,站网密度为 489 km²/站。依据水文站网规划技术导则 SL34—92 所述“面雨量站采用平均每 300 km² 一站(荒僻地区可放宽)的密度布设”^[4],该流域站网密度稍大。采用数字流域模型生成该流域水系,并自动划分单元,如图 1。S 流域共分为 A、B、C 三个单元,其中 A 单元面积 944 km²,2 个雨量站,站网密度为 472 km²/站;B 单元面积 794 km²,1 个雨量站,站网密度为 794 km²/站;C 单元面积 705 km²,2 个雨量站,站网密度为 353 km²/站。由此可初步分析,B 单元内站网密度最大,雨量站代表性不足,可初步考虑在该单元内增设雨量站。

3.2 数字流域与相关分析集成应用

相关分析是分析流域内雨量站间降雨特性相关程度的方法,相关系数越高表明雨量站降雨特性的相似性越强,即其中一个站的雨量可代表其余测站;在大部分场次洪水中相关性均较高的两个雨量站,可考虑归并为一个站,在不影响精度的前提下减少投资和维护费用。反之,相关系数较小则不能减少雨量站,可能还要在降雨特性差别大的雨量站间增设雨量站。两个雨量站之间的雨量相关系数为:

$$R_{ij} = \frac{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m ((X_{ik} - \bar{X}_i)(X_{jk} - \bar{X}_j))}{\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (X_{ik} - \bar{X}_i)^2} \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (X_{jk} - \bar{X}_j)^2}}$$

式中: $i、j$ 为雨量站 ($i=1\sim n, j=1\sim n$), X_{ik} 和 X_{jk} 表示第 i 个站、第 j 个站的第 k 个雨量指标 ($k=1\sim m$)。 $R_{ij} \leq 1$, R_{ij} 越接近于 1,说明 $i、j$ 两个雨量站的降雨特性越相似; R_{ij} 越小,接近于 0 时,说明 $i、j$ 两个雨量站的降雨特性越不相似;当 R_{ij} 为负数时,表示 $i、j$ 两个雨量站的降雨特性相反,即降雨极不同步^[5]。图 1 所示 S 流域的 5 个雨量站在两场降雨过程中的相关系数见表 1。

表 1 可见,在 1、2 号降雨中相关系数均较高的为 1~2 站,都位于 A 单元;1~4、2~4 在 2 号降雨中的相关系数较高,但在 1 号降雨中的相关系数却很低。此外,针对本流域多场降雨的相关分析(结果略)同样表明,S 流域仅 1~2 两站的相关系数在每场降雨中均高于 0.7,其余雨量站的相关系数则无此规律。是否将 1、2 雨量站做精简,还需要结合其他站网论证方法的成果

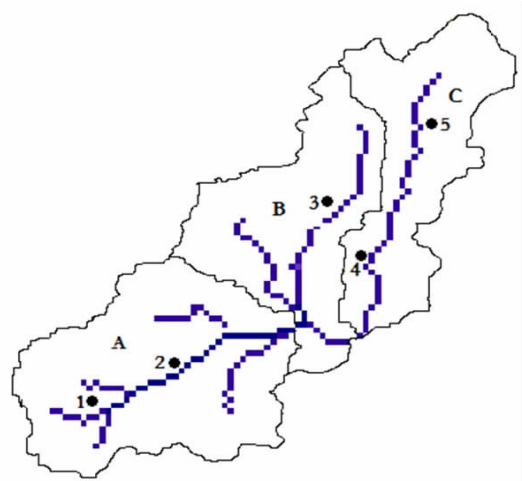


图 1 S 流域单元划分图

Fig.1 Division of the units in S basin

表1 S流域两场降雨的雨量站相关系数表

Table1 The Correlation coefficient of the 2 rainfall in S basin

1 号降雨						2 号降雨					
雨量站	1	2	3	4	5	雨量站	1	2	3	4	5
1	1					1	1				
2	0.922	1				2	0.772	1			
3	0.388	0.444	1			3	0.368	0.357	1		
4	0.433	0.425	0.318	1		4	0.749	0.891	0.314	1	
5	0.222	0.212	0.575	0.242	1	5	0.054	0.101	0.283	0.121	1

综合分析确定。

数字流域的单元是依据水系划分的，单元间的分隔线通常为水系的分水岭，因此，从物理意义分析，当流域为高山峡谷型且划分单元面积较大时，单元间雨量站的相似性较小，单元间雨量站的相关分析可依据其他方法的成果简化或省略。

3.3 等雨量线图应用分析

等雨量线是指给定时段内降水量相等各点的连线，等雨量线图是用来描述一场暴雨时空分布特性和反映暴雨定量依据的一种较好方法^[1]。由于测站和技术水平限制，长期以来等雨量线主要采用手绘的形式，应用受到一定限制。近年来，随着数字流域和 GIS 技术的快速发展，等雨量线自动提取、生成技术渐趋成熟，已广泛应用于水文、水利部门。

众所周知，等雨量线图的正确刻画和勾绘，主要取决于雨量站的数量和空间分布，它应以能基本控制天气系统差异和地形等因素的影响为原则^[1]。依据流域内雨量站网绘制的等雨量线图，可轻易分析出流域的暴雨中心和暴雨走向，为雨量站布设提供依据（暴雨中心或雨量变化明显的区域，应多布设雨量站），并可作为评判雨量站数量与分布合理性的有效手段。

图 2 为广东省新丰江流域 2000 年 9 月一场降雨过程中 3 个雨量集中时段的等雨量线图。

图 2 可见，该场降雨有明显的降雨中心，且降雨中心不固定，9 月 1 日白天全流域普降大雨，其中西部降雨最大，自西向东逐级减小；9 月 1 日夜间至 2 日凌晨，雨量减小，且降雨中心移至流域南部库区附近；9 月 2 日上午，雨区逐渐东移，流域东部降雨最大。通过图 2 可明显了解该场降雨的分布和走向，对于雨型的分析十分有效；但同时可以看出：(a) 图中等雨量线主要有 60、80、100、120mm 四条，即相邻两条等雨量线的间隔为 20mm，流域北部基本有相应的雨量站勾绘等雨量线，但南部库区附近则仅依据 61、119mm 降雨的两个雨量站插值勾绘了 80、100 和 120mm 的等雨量线；(b) 图所示流域南部库区附近同样存在依据两个雨量站勾绘中间多条等值线的情况；(c) 图降雨主要集中在东部，雨量站降雨值基本满足等雨量线的刻画。

插值是等雨量线绘制中不可或缺的技术，常用的空间插值方法有反距离加权插值法、样条函数插值法、克里金插值法、多项式插值法等，国内外诸多学者对空间插值方法进行了研究、比较应用等，该技术基本成熟^[6]。但降雨的影响因素多样，且难以完全用数学形式表达，因此等雨量线绘制的正确性，主要取决于雨量站的分布，插值仅应用于较小数据的范围（通常小于等雨量线的间隔）。长期存在相邻雨量站间插值多条等雨量线的情况表明该区域实际雨量分布难以由现有雨量站刻画，即雨量站的布设需要调整。上述分析即表明新丰江流域南部现有雨量站难以刻画实际雨量分布，插值现象严重，需要增设测站。

3.4 历史洪水预报分析

站网布设的目的是实时采集流域的降雨分布、降雨量，从而为来水预报服务。在站网论证阶段，针对多场历史洪水，采用预报模型，通过改变站网配置组成多种站网方案进行历史洪水过程的拟合计算，从而将站网布设与预报有可能达到的精度联系起来。此方法进行站网论证不但能作定性分析，而且能作定量计算，是站网论证最直观、有效的方法。此方法的主要做法如下：

(1) 制作现有水文站控制范围的数字流域，并将一个流域分为若干子流域，其中包括水文站之间的区间流域。分子流域的目的在于考虑子流域之间因地形、下垫面等条件不同而选用不同的模型参数。

(2) 采用数字流域模型将每一子流域细分为几个单元，以考虑单元之间降雨分布不均匀及上、下单元洪水传播的影响。

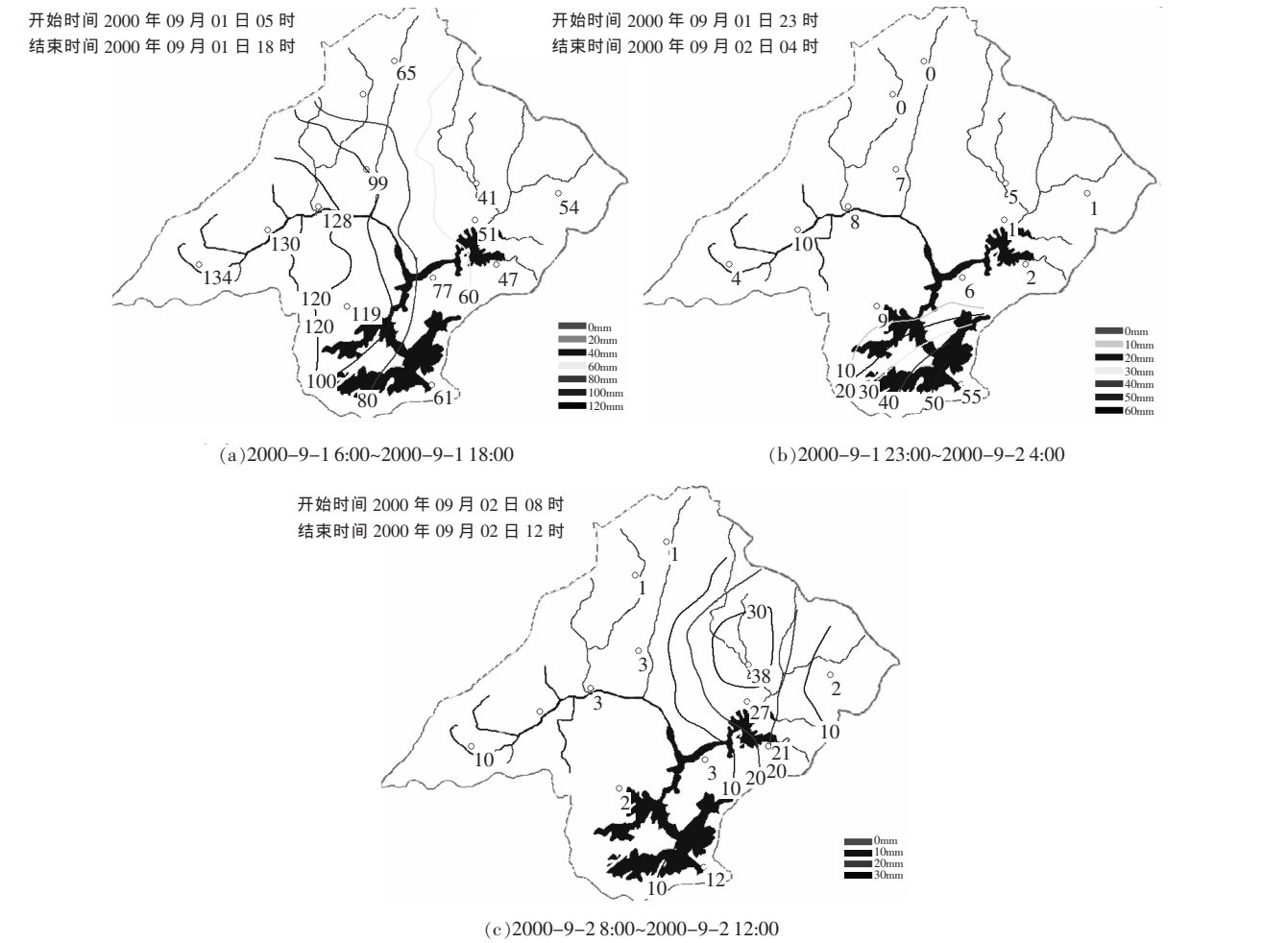


图 2 新丰江流域 2000 年 9 月部分时段降雨过程等雨量线图

Fig.2 The isohyets of the Xinfengjiang watershed in September 2000

(3)依据上述站网论证方法的初步分析成果,建立不同的站网组成方案;针对每一种站网组成,将单元与泰森多边形叠置分析,从而获得每一单元的雨量站和权重配置,作为一种雨量站网配置方案。

(4)对于每一种雨量配置方案,进行子流域内各单元的产汇流计算、单元至子流域出口的河道汇流演算和上游子流域入流至该子流域的河道演算形成子流域完整的预报过程。

(5)根据实际运行需要,选用若干年历史水文资料,采用全部测站雨量数据,对每一子流域应用洪水预报参数率定系统^[7]推求有关参数,在调试达到一组最佳参数的条件下,分析其实测与计算过程或洪峰、洪量拟合合格率成果。

(6)改变参数率定系统中关于雨量站的配置,针对(3)组合的每一种站网方案,调用上述子系统即可获得其方案的拟合成果。

以往预报模型采用流域的算术平均雨量或由泰森多边形计算的加权平均雨量作为整个流域的面平均雨量。实际上,流域内雨量站控制的范围受地形、大气等多种因素影响,譬如分水岭两侧,相对于一场锋面雨来讲,分属于迎风坡和背风坡,其降雨量必定存在差异,不考虑地形因素的泰森多边形划分方法势必影响面雨量的计算,进而对预报精度造成一定的影响。数字流域的出现在一定程度上解决了这个问题,利用 GIS 空间分析的叠置分析功能,将数字单元与泰森多边形进行空间叠加进而计算单元雨量、子流域雨量,既考虑了流域下垫面的空间差异,又考虑了降雨空间分布不均的影响,更符合流域雨量分布特性。具体应用示例见参考文献[5]。

4 结语

流域的降水分布直接受到地形、地貌、气候等特

征的影响, 本文尝试将反映流域地形信息的数字流域与站网密度、相关分析、雨量等值线、历史洪水预报分析4种站网论证技术集成, 并进行了应用示例研究。与数字流域集成的雨量站网论证方法较传统方法更多的考量了降雨分布, 依据降雨分布特征确定雨量站点的布设, 其基本思想可为类似的站网论证分析提供借鉴作用。站网布设的论证和实施是一个渐进的过程, 需要通过实际情况(包括资料分析)的多种检验, 而逐步调整趋向合理和最优, 不能简单的依据一、两种方法做出决策。

随着地貌、气候特征信息获取的便易性和精度的提高, 可考虑在站网规划论证阶段进一步融入地貌、气候特征进行相关的应用研究, 使站网布设更经济、合理。

参考文献:

- [1] 张恭肃, 朱星明. 关于水文自动测报系统建设中站网布设的分析论证[J]. 水文, 1993,2:13-20. (ZHANG Gongsu, ZHU Xingming. Demonstration of network on the construction of hydrological automatic measuring and reporting system [J]. Journal of China Hydrology, 1993,(2):13-20. (in Chinese))
- [2] 刘家宏, 王光谦, 王开. 数字流域研究综述[J]. 水利学报, 2006,37(2):240-246. (LIU Jiahong, WANG Guangqian, WANG Kai. Review on advancement of study on digital river basin in china [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006,37 (2): 240 -246. (in Chinese))
- [3] 李春红, 任立良, 达卫特, 等. 数字流域水系构建方法浅析[J]. 水文, 2002,22(6):1-4. (LI Chunhong, REN Liliang, DA Weite, et al. Preliminary analysis of the method of building digital basin [J]. Journal of China Hydrology, 2002,22(6):1-4. (in Chinese))
- [4] SL34-92, 水文站网规划技术导则[S]. (SL34-92, Technical Regulations for Hydrologic Network Design [S]. (in Chinese))
- [5] 李春红, 罗清标, 冯永修. 新丰江流域雨量站网分析论证[J]. 水电自动化与大坝监测, 2008,32(3):1-3. (LI Chunhong, LUO Qingbiao, FENG Yongxiu. Demonstration of rainfall network in Xinfengjiang drainage area [J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2008,32(3):1-3. (in Chinese))
- [6] 黄丙湖, 孙根云. 雨量线自动提取的分析与实现[J]. 计算机工程与设计, 2010,31(15): 3499-3502. (HUANG Binghu, SUN Genyun. Analysis and realization of automatic extracting isohyets [J]. Computer Engineering and Design, 2010,31(15):3499-3502. (in Chinese))
- [7] 王建平, 李春红, 王文鹏. 通用实时洪水预报系统设计与开发[J]. 水电厂自动化, 2010, 31(1):64-69. (WANG Jianping, LI Chunhong, WANG Wenpeng. Design and construction of the general flood forecasting system [J]. Hydropower Plant Automation, 2010,31(1): 64-69. (in Chinese))

Integration of Digital Basin and Rainfall Network Demonstration Technology

LI Chunhong, WANG Jianping, CHEN Jian, XIE Xiaoyan

(State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003 China)

Abstract: There are shortages in correlation between existing method of rainfall network demonstration and influencing factors of the precipitation distribution. We took the digital basin into the methods of rainfall network demonstration, and described the digital basin construction and information extraction technology. The integration of digital basin and rainfall demonstration technology were made in this paper, the technology of rainfall demonstration includes station network density, correlation analysis, rainfall contours and historical flood forecast analysis. The integrated method of digital basin and rainfall network takes into account the influencing of terrain. The basic idea can offer a reference function for other similar rainfall network demonstration analysis.

Key words: station network demonstration; flood forecasting; digital basin; isohyet