

文章编号:1007-2284(2005)02-0044-03

基于 GIS 和 DEM 的 九龙江流域地表水文模拟

黄金良^{1,2}, 洪华生², 杜鹏飞¹, 张珞平²

(1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 厦门大学国家教育部海洋环境科学重点实验室
厦门大学环境科学研究中心, 福建 厦门 361005)

摘要:运用 GIS 软件 ARC/INFO、ArcView, 以九龙江流域为例, 探讨了数字高程模型 (DEM) 的处理及其水文模拟分析。对九龙江流域分幅数字高程模型 (DEM) 进行图幅拼接、网格重分及切割等处理分析, 生成九龙江流域数字高程模型。基于 DEM 和 GIS 进行流域的水文模拟分析, 包括洼地填充、水流方向计算、水流累积量计算、水网提取, 最后进行了九龙江全流域及子流域界线的划分, 生成了数字流域。

关键词: DEM; GIS; 九龙江流域

中图分类号: TV123 **文献标识码:** A

Surface Water Hydrology Simulation of Jiulong River Basin Based on GIS and DEM

HUANG Jin-liang^{1,2}, HONG Hua-sheng², DU Peng-fei¹, ZHANG Luo-ping²

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing City 100084, China;
2. Key Lab of Marine Environment Science of the Ministry of Education,
Environment Science Research Center of Xiamen University, Xiamen City 361005)

Abstract: The treatment and hydrology simulation analysis of digital elevation model (DEM) are discussed using ARC/INFO and ArcView of GIS software with an example of the Jiulong River Basin. The digital elevation model of the Jiulong River Basin is generated through map mosaic, grid re-division, and separation of all the DEM maps of the Jiulong River Basin. The hydrological simulation is conducted based on DEM and GIS, for the major processes of lowland water infilling, calculation of water flow direction and water flow accumulation, and water network layout. Finally the digital basin is generated through separations of the whole basin and the sub-basins of the Jiulong Basin.

key words: DEM; GIS; Jiulong River Basin

1 概述

20 世纪 60 年代是水文学发展的重要时期, 出现了大量的流域水文模型, 如 SCS 径流曲线方程、Standford 流域模型 (SWM) 等。这些模型至今仍运用较广。近十几年来, 流域水文模拟的研究方法发生了改变, 表现在计算机技术、空间技术如地理信息系统 (GIS)、遥感技术 (RS) 在水文模拟研究中的应用, 其特点是通过 GIS 等技术可自动计算流域的基本地形参数, 水文模拟效率得以显著提高。目前基于空间技术的水文模拟研究大都是在数字高程模型 (DEM) 的基础上进行的。DEM 是用于流域地形分析的主要数据。由 DEM 可提取流域的数字特征, 包括确定单元格网的流向、汇流路径、河网间的拓扑结

构、流域及子流域的边界划分等, 从而为水文模型提供下垫面数据的输入^[1]。国外采用 GIS 的栅格数据 (DEM) 研究地表水文特性, 已作了大量的工作, 国内这方面的工作报道较少^[2-3]。比如, 国外研究开发了许多能生成数字流域的成熟算法和软件, 如 ESRI 提供的 ARC/INFO GRID 模块, ArcView 扩展模块 hydrologic Functions, RSI 提供的 River Tools, Carbrecht J, Martz W 的 TOPAZ 工具, 此外, 美国 Brigham Young 大学开发的 WMS 软件, 美国自然资源保护局和农业研究局联合开发的分布式参数模型 AnnAGNPS^[4] 都运用 TOPAZ 进行子流域的划分。

本文采用美国 ESRI 提供的 ARC/INFO GRID 模块, ArcView 扩展模块 Hydrologic Functions, 以福建省第二大流域九龙江为例, 进行流域的水文分析, 模拟了水流方向、提取了水网, 对流域界线进行划定, 划分了子流域。这些研究结果对九龙江流域农业非点源污染控制研究有重要的现实意义。

收稿日期: 2004-03-22

基金项目: 福建省重大科技项目 (编号: 2002 H009)。

作者简介: 黄金良 (1975-), 男, 博士研究生。

2 研究方法

2.1 DEM 的建立和处理

栅格 DEM 建立的具体方法和过程为: 矢量化 1:5 万地形图, 建立空间拓扑关系; 地图投影坐标系统设置, 由于涉及到面积量算, 采用高斯克列格投影, 坐标系为北京 54 坐标, 单位为 m; 采用三角化不规则网 (TIN: Triangulated Irregular Network) 方法, 将矢量线图转换成 TIN 数据结构, 并进行空间插值; 将 TIN 数据结构转换成网格结构 (LATTICE); 对网格数据进行重采样, 形成栅格 DEM (GRID)。本研究采用福建省基础地理信息中心 1:5 万 DEM 原始数据。在 ARC/INFO 系统中, 经图幅合并、网格重分和流域界线切边等几个步骤得到九龙江流域数字高程模型, 见图 1(a)。流域界线的生成, 后有详细阐述。

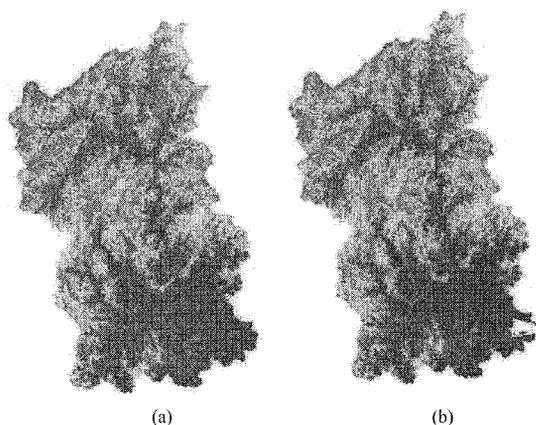


图 1 九龙江流域数字高程模型 (GRID)

2.2 水流方向分析

Mark 等学者的研究表明, 确定各个栅格单元的水流方向是采用 DEM 进行地表水文分析的基础^[5]。一个栅格的水流方向就是水体从其中流出的方向。水流流向的确定有多种算法, 如 D8、Rho8、FD8、Frho8、DEMON、TAPES-C 算法等。ARC/INFO GRID 模块、ArcView 扩展模块 Hydrologic Functions 采用 D8 算法进行水流流向的计算。这种算法首先计算单元格与周围 8 个单元格间的坡度, 按最陡坡度原则确定单元格的流向。通过栅格单元 x 的 8 个邻域栅格编码, 水流方向便可以其中的某一值来确定。有效的水流方向定义为东北、东、东南、南、西南、西、西北和北, 并分别用 128、1、2、4、8、16、32 和 64 这 8 个有效特征码表示。

2.3 集水区的划分与河流网络的分析

汇流能力强的栅格所在的区域就是集水区, 集水能力特征值为零的则代表着区内的高地。据此可划分研究区内分水岭的空间分布和集水区的边界^[3]。根据栅格汇流能力的分析结果, 将汇流能力超过一阈值 (一般大于 100)^[5] 的栅格作为水道, 将小于该阈值的栅格作为产流区, 从而划分河流网络系统。河流网络栅格文件建立之后, 可进一步确定河流的级序和河流链等特征^[6]。

3 基于 GIS 和 DEM 的九龙江流域地表水文模拟分析

基于九龙江流域 DEM, 运用 ARC/INFO 的 GRID 模块及

ArcView 空间分析中的水文分析模块 Hydrologic Functions 进行九龙江流域的实例分析。基于栅格数据的地表水文模拟分析, 具体的方法和步骤主要包括 3 个方面^[7], 即: 洼地 (沉陷点) 填充及水流方向的分析; 流水累积量计算及河流网络模拟分析; 流域 (集水区) 划分。

3.1 洼地填充与水流方向分析

由 DEM 提取流域的数字特征, 洼地填充是其中较难处理的问题之一。而洼地是进行水文分析的一障碍, 在确定水流方向以前, 必须将洼地填充^[8]。消除洼地的常用方法有平滑滤波、填充抬高方法, 前者可消除孤立的、较浅的洼地, 而保留较大的洼地; 后者可以消除所有洼地, 但会产生大片平坦的地形。本文所选用的 ARC/INFO GRID 模块、ArcView 扩展模块 Hydrologic Functions 采用填充抬高的方法消除洼地。在 ArcView 水文分析模块 Hydrologic Functions 中通过 Fill Sinks 函数将洼地填充, 使洼地成为水流能够通过平坦区域。值得强调的是, 生成无洼地 DEM, 凹陷点的识别和去除是一个反复的过程, 即当一个凹陷被去除后, 可能导致其周围又产生新的凹陷点。但 Fill sink 函数经过反复的运算, 最终可生成无洼地的数字高程模型 (Filled DEM), 保证水流畅通流至河口, 见图 1(b)。因此, 经洼地填充之后, 九龙江河口就显示出来。在 Filled DEM 中由于无洼地存在, 自然流水可以畅通无阻地流至区域地形的边缘。相对低平地的水流方向的确定也是 DEM 提取数字流域特征时会遇到的难题。在通过洼地填充生成无凹陷的 DEM 的基础上, 利用 Flow Direction 函数便可进行水流流向分析。

3.2 流水累积量计算与河流网络模拟分析

区域流水累积量矩阵表示区域地形每点的流水累积量, 它可以用区域地形曲面的流水模拟方法获得, 流水模拟可以利用区域的数字地面高程模型的水流方向数字矩阵来进行^[2]。流水累积量可用以提取地表水分布图, 是水网提取的基础。

水网密度根据地表的流水方向数字矩阵确定河流的最小长度, 显示出区域内水系分布的密集程度。给定河流的最短长度值越小, 水系分布越密集。在 ARC/INFO 的 GRID 模块中, 在水流流向分析的基础上, 通过 FLOWACCUMULATION 函数计算水流累积量, 通过给定一域值, 如 100、1 000、10 000, 其单位是栅格数, 可获得基于 NO DATA 背景的水系栅格图。笔者根据能体现九龙江主要水系, 但不至于生成太多细小河流的原则, 选定了域值 1 000 来模拟出水系栅格图。最后通过 STREAMORDER 函数和 STREAMLINE 函数对水网进行分级和矢量化, 图 2(a) 为模拟的河流最小长度为 1 000 m 的水网密度图, 与图 2(b) 由地形图勾绘的九龙江流域的水系分布图吻合很好。反映了利用 DEMs 模拟的河流网络的空间分布接近实况。

3.3 流域划分

流域是指流经其中的水流和其他物质从一个公共的出口排水从而形成的一个集中的排水区域, 是给定点的汇水区域, 子流域是给定的流域的一部分, 表明流域内的从属关系^[8]。

3.3.1 九龙江全流域界线的划定

根据九龙江流域 1:5 万 DEM 和 1:10 万水系, 按照 DEM 的山脊线 (根据水往低处流的原理), 勾绘流域界线使水

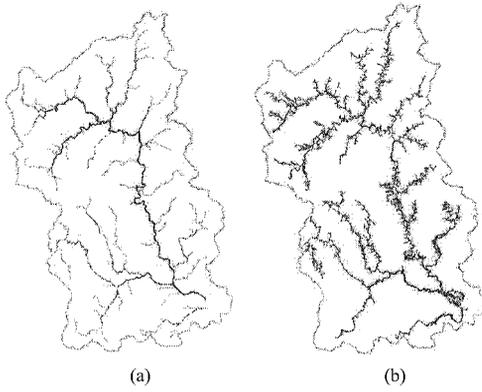


图2 九龙江流域水网分布图

系分布图包含在界线之内,形成九龙江流域的初步界线图,利用 ARC/INFO 的 SELECTPOLYGON 函数以此多边形图层切割由 46 个图幅组成的 DEM,形成九龙江流域的 DEM,后按照上述的水文分析步骤,经洼地填充、水流方向提取后,利用 ARC/INFO 的 BASIN 命令,生成九龙江流域的集水区界线图,见图 3(a)。由图可见,所生成的流域界线与初步界线图基本吻合。笔者也尝试用经 46 幅 1:5 万 DEM 拼接而成、重采样生成的全流域 DEM 进行流域集水区界线提取,见图 3(b),所生成的界线与前者一致。但两种集水区划分中都将南溪支流(图 3 上标为 2)从九龙江流域(图 3 上标为 1)中分割出来,且九龙江河口处也未包含在九龙江集水区界线内,造成这种现象出现的原因可能是由于 DEM 在处理河口地带精度有限所致。

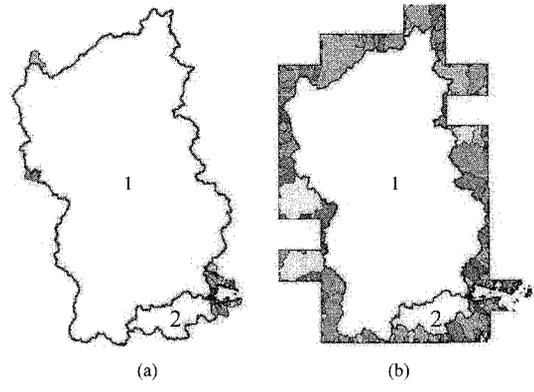


图3 九龙江流域界线划分

3.3.2 九龙江子流域界线的确定

根据水流方向、流水累积量和水网分布图层,运用 WATERSHED 进行子流域的生成。在划分子流域之前,先要确定出水点,在 ARC/INFO 中,可用 SELECTPOINT 函数进行出水点的选择。考虑到每一子流域出口处地表水质的监测的便利和模型验证的需要,本研究大都以九龙江地表水省控断面为子流域出口处,进行子流域的划定。通过 ARC/INFO GRID 模块划分了 14 个子流域,即:万安溪、雁石溪、万安溪下游、北溪漳平段上游、北溪漳平段下游、北溪华安段、龙津溪、北溪浦南段、花山溪、船场溪、芴江永丰溪、文峰黄井溪、九龙江河口、南溪。各子流域的面积如表 1 所示。九龙江主要包括两大干流:北溪和西溪。模拟的北溪干流子流域(编号 1~8)及西溪

表1 九龙江流域子流域划分

编号	子流域名称	流域出口与省控断面	流域面积/km ²	编号	子流域名称	流域出口与省控断面	流域面积/km ²
1	万安溪流域	北 3	1 292.30	8	北溪浦南段以南	北 11	414.47
2	雁石溪流域	北 2	1 123.27	9	花山溪流域	西 1	865.49
3	万安溪下游	北 5	452.14	10	船场溪流域	西 2	924.40
4	北溪漳平段上游	北 6	2 203.16	11	芴江永丰溪流域	西 3	1132.15
5	北溪漳平段下游	北 7	1 572.46	12	文峰黄井溪流域	西 4	653.23
6	北溪华安段	北 8	1 611.02	13	九龙江河口段	北 12	755.30
7	龙津溪	北 10	893.40	14	南溪流域	北 12	819.38

注:省控断面地理位置于 2003 年取自《福建省地表水监测技术规定》,福建省环境监测中心。

干流子流域(编号 9~13)的总面积分别是 9 562.22 km² 和 4 181.92 km²。与漳州市水土办的统计面积 9 640 km² 和 3 940 km² 相差 - 0.81 % 和 + 6.14 %。

福建省水文水资源勘测局提供的浦南、漳平、郑店水文站的集水面积与本研究划定的几个子流域集水面积相近,偏差在 ±8 % 以内,如表 2 所示。

表2 九龙江流域主要水文站集水区面积

水文站	集水面积/km ²		
	本研究计算值	省水文站提供	偏差/%
浦南	8 254.35	8 940	- 7.67
郑店	3 575.27	3 417	4.63
漳平	5 070.87	4 940	2.65

注:本研究中浦南站水文站的集水区面积为编号 1~6 的子流域的面积总和;郑店集水区面积为编号 9~12 的子流域的面积总和;漳平站的集水区面积为编号 1~4 的子流域的面积总和。

子流域的划分是水文模拟重要的一步,因为在同一子流域内往往具有相同的地貌特征和水文特性。将中等尺度的流域离散化为诸多具空间异质性的子流域,进而进行子流域的控制研究,是非点源污染研究的重要的研究方法和手段。因此,子流域的划分,对九龙江流域的农业非点源污染的控制研究提供了重要的数据平台。

4 结果与讨论

本研究成功地运用 ARC/INFO 和 ArcView 的水文分析模块进行九龙江流域数字高程模型的处理及水文模拟分析,其结果和讨论如下。

(1) 对九龙江流域的地表水文模拟分析结果表明,利用 DEMs 模拟的河流水系的空间分布接近实际分布情况,数字流域界线的确定与水文部门基本相符。

(2) 成功地运用 ARC/INFO 和 ArcView 进行九龙江子流

(下转第 50 页)

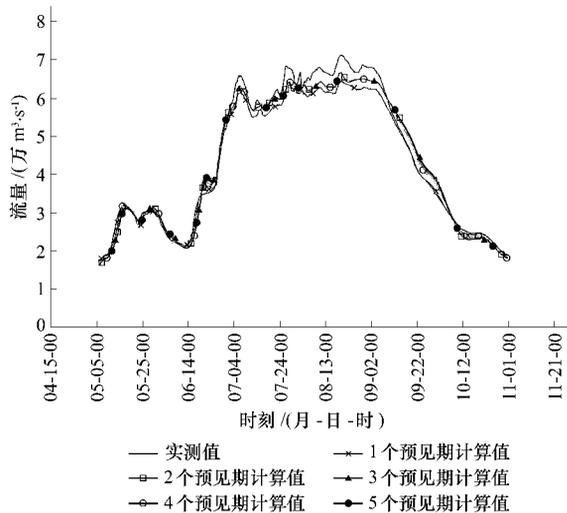


图3 1998年汉口站实测流量与计算流量过程对照图

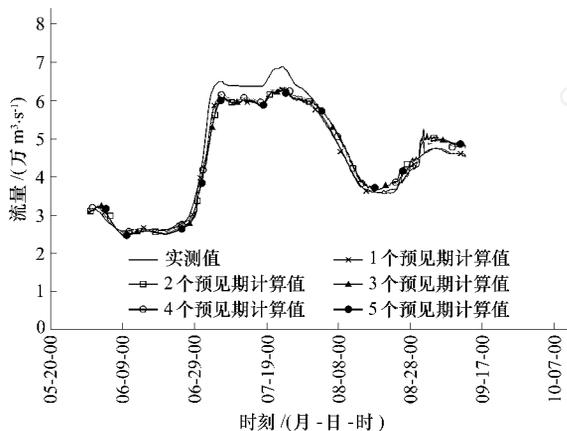


图4 1999年汉口站实测流量与计算流量过程对照图

学习期模型的平均相对误差为 2.25%，确定性系数为 99.02%，洪峰场次合格率为 92.3%，峰现时差合格率为 84.62%。

检验期模型的平均相对误差 1 个预见期为 3.31%，2 个预见期为 4.60%，3 个预见期为 5.50%，4 个预见期为 6.07%，5 个预见期为 6.41%，确定性系数 1 个预见期为 98.02%，2 个预见期为 97.79%，3 个预见期为 96.86%，4 个预见期为 96.22%，5 个预见期为 95.81。5 个预见期的合格率也在 60% 以上，峰现时差检验合格率均达 75% 以上。

4 结 语

河道洪水传播的物理过程具有不确定性，因此，用确定性模型拟合得好比较困难，而人工神经网络具有较强的非线性作用，能够描述输入 - 输出模式的复杂性。本文以长江中游螺山、汉口站及区间支流入流洪水过程为研究对象，采用一种改进 BP 算法，并在计算过程中将输入数据转化为与输出激励函数统一的尺度，适当缩放上下限，建立了考虑区间入流的河道洪水预报 BP 神经网络模型。模拟结果表明，该模型能较好地反映区间入流对汉口站洪水过程的影响，并且在延长预见期为 5 d 的情况下有较好的预报精度。若能应用较长资料（如 40 ~ 50 年）来训练模型，以使模型具有更好的模拟精度及推广应用具有重要意义。

参考文献：

- [1] 覃光华, 丁 晶, 刘国东. 自适应 BP 算法及其在河道洪水预报上的应用[J]. 水科学进展, 2002, (1).
- [2] 李致家, 孔祥光. 河道洪水演算的神经网络模型[J]. 河海大学学报, 1997, 25(5).
- [3] 阎平凡, 张长水. 神经网络与模拟进化计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 26 - 27.
- [4] 袁作新. 流域水文模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1981.
- [5] 焦李成. 神经网络系统理论[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1990: 35 - 50.
- [6] 胡铁松. 神经网络预测与优化[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 1997: 45 - 52.
- [7] 中华人民共和国水利部. SL250 - 2000, 水文情报预报规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.

(上接第 46 页)

域的划分, 所划分的子流域出水口很好地结合了九龙江流域地表水省控断面, 可充分利用现有的监测数据进行各子流域的水质监测, 并为九龙江流域土壤侵蚀、氮磷负荷空间分布的探讨以及流域农业非点源控制区划提供基础的数据平台。

参考文献：

- [1] 吴险峰, 王中根, 刘昌明, 等. 基于 DEM 的数字降水径流模型[J]. 地理学报, 2002, 57(6): 671 - 678.
- [2] 沈晓东, 王腊春, 谢顺平. 基于栅格数据的流域降雨径流模型[J]. 地理学报, 1995, 50(3): 264 - 269.
- [3] 梁天刚, 张胜雷, 戴若兰, 等. 基于 GIS 栅格系统的集水农业地表产流模拟分析[J]. 水利学报, 1998, 7: 26 - 29.

- [4] Bingner R L, Garbrecht J, Arnold J G, et al. Effects of watershed subdivision on simulation runoff and fine sediment yield[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1997, 40(5): 1329 - 1335.
- [5] Mark D M. Network models in geomorphology modeling in geomorphological systems[J]. John Wiley, 1988.
- [6] Strahler A N. Quantitative analysis of watershed geomorphology [J]. Transactions of the American Geophysical Union. 1957, (8): 913 - 920.
- [7] 汤国安, 陈正江, 赵牡丹, 等. ArcView 地理信息系统空间分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [8] 李志林, 朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1999.