

基于 GIS 和 DEM 的乌江流域地表水文模拟

唐从国^{1,2}, 刘丛强¹

1. 中国科学院 地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049

摘要:基于 GIS 和 DEM 的流域地表水文模拟可为分布式水文模型提供下垫面数据输入。本文采用内嵌于 ArcGIS 的地表水文分析工具 Arc Hydro Tools, 结合 ArcGIS 及其扩展模块 Spatial Analyst, 以贵州省内乌江流域为例, 进行了流域水文模拟分析。运用 Arc Hydro Tools 进行地表水文模拟分析, 主要包括以下 4 个流程: DEM 的预处理、水流方向的确定、汇流栅格图的生成、自动提取河网和子流域边界。试验结果表明, 提取河网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。

关键词: Arc Hydro Tools; DEM; 最小水道集水面积阈值; 河网; 流域

随着数字技术的迅猛发展, 特别是地理信息系统(GIS)在海量数据存储与管理、空间分析及可视化显示和制图等方面的卓越功能, 使水文模型研究的重点从流域水文统计模型转到 GIS 与水文机理模型相结合的分布式水文模型, 而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, 包括确定栅格单元的流向、汇流路径、河网间的拓扑结构、流域及子流域的边界划分等, 从而为分布式水文模型提供下垫面数据的输入^[1]。国外采用 GIS 与栅格 DEM 数据研究地表水文特性, 已做了大量的工作, 而国内这方面的工作报道较少^[2,3]。目前国外已研究和开发了许多能生成数字流域的成熟算法和软件, 如美国 ESRI(Environmental Systems Research Institute)公司提供的 ArcGIS 及相应的水文扩展模块、美国陆军工程公司研制的 GRASS(Geographic Resources Analysis Support System)系统、RIVIX 提供的 River Tools(2003 年 8 月以前由 RSI 公司提供)、Garbrecht 和 Martz 的 TOPAZ(TOPographic PArameteriZation)工具以及美国 Brigham Young 大学开发的 WMS(Watershed Modeling System)软件等。

Arc Hydro Tools 是基于 ArcGIS 和 Arc Hydro 数据模型开发的一套用于支持地表水资源

应用研究的工具集, 最新版本可以在 ESRI 公司官方网站(<http://www.esri.com>)免费下载。Arc Hydro 数据模型是由 ESRI 公司和美国奥斯汀大学联合开发推出的一个开放式的、基于 COM 类的、可扩展的水资源领域的数据库模型。Arc Hydro Tools 正是对 Arc Hydro 数据模型的实例化, 包含三个核心功能模块: 基于 DEM 的数字流域描述、水系网络的构建、属性数据管理和网络追踪统计分析, 本文主要应用其基于 DEM 的数字流域描述功能模块。

本文采用内嵌于 ArcGIS 的地表水文分析工具 Arc Hydro Tools, 结合 ArcGIS 及其扩展模块 Spatial Analyst, 以贵州省内乌江流域为例, 进行流域地表水文分析, 模拟了水流方向, 自动提取了流域河网, 对流域界线进行划定并划分了子流域。这些研究结果对乌江流域分布式水文模型的建立和非点源污染控制研究有重要的现实意义。

1 研究方法

(1) DEM 的预处理: DEM 的预处理包括“burn-in”主干河网和填平洼地。“burn-in”主干河网是为了使提取的河网与实际河网相吻合, 而将手工数字化的流域河网所在栅格的高程值人为降低一定数值的预处理方法, 这就相当于把实际河网嵌入到 DEM。DEM 用于流域地形分析的前提条件是: DEM 中不能有洼地和小平原等地形, 否则, 所提取

收稿日期: 2006-04-03 收到

基金项目: 中国科学院知识创新工程资助项目(KZCX3-SW-140)

第一作者简介: 唐从国(1978-), 男, 博士研究生, 研究方向: GIS 与流域水文水环境研究。

河网将是不连续的^[4]。填平洼地就是将 DEM 中的所有洼地填平,使之成为一个具有“水文学意义”的 DEM,从而保证从 DEM 中提取的河网是连续的。必须指出的是,DEM 预处理过程不是必需的,由 DEM 数据的精度决定。如果 DEM 精度足够高,可以跳过这一过程。

(2)水流方向的确定:Mark^[5]的研究表明,确定各个栅格单元的水流方向是用 DEM 进行地表水文分析的基础。一个栅格的水流方向就是水体从其中流出的方向。水流方向的确定有多种算法,如 D8、Rho8、DEMON、D ∞ 、FD8、Frho8、TAPES-C 算法等。Arc Hydro Tools 采用 D8 算法确定水流方向,该算法假定每个栅格的水流方向只有 8 种可能,即只能流入与之相邻的 8 个栅格中,8 个方向分别用不同的代码编码:1 表示“正东”,2 表示“南东”,4 表示“正南”,8 表示“南西”,16 表示“正西”,32 表示“北西”,64 表示“正北”,128 表示“北东”。一个栅格的水流方向定义为流向与之相邻 8 个栅格中坡度最陡的单元。坡度按下式计算:

$$\theta_{ij} = \arctg \left| \frac{H_i - H_j}{D} \right|, \quad (1)$$

式中, H_i 是中心栅格的高程, H_j 是相邻栅格的高程, D 为两个栅格中心点之间的距离,若两栅格单元为水平或垂直方向相邻,则 D 为单元格长度;若为对角线方向,则 D 为 $\sqrt{2} \times$ 单元格长度。

(3)汇流能力分析:栅格的汇流能力反映该栅格汇聚水流能力的强弱程度,一个栅格的汇流特征值就是水流能够流入其中的栅格的数目。因此,一个栅格的汇流特征值越大,表示水流能够流入其中的栅格数目越多,其汇流能力也就越强;反之则较弱。

(4)河网的提取和子流域的划分:汇流能力强的栅格所在的区域就是集水区(山谷),汇流特征值为零的则代表着区内的山脊。据此可划分研究区内分水岭的空间分布和集水区的边界。DEM 中某一栅格点若能够形成水系,则必须有一定规模的上游集水区,因此可以给定一个适当的最小水道集水面积阈值^[6],将上游集水面积大于该阈值的栅格点定义为水道,小于该阈值的栅格作为产流区,从而提取河网。

子流域的划分首先要确定子流域的出口位置,可以有两种方法,如果子流域出口点的地理位置坐标已知,可以手工添加子流域的流域出口,子流域的范围就是汇入该点的上游所有栅格单元所占区域。如果不知道子流域出口点位置,那就以两个河道的交汇点作为流域出口,分别沿上游河道计算集水区

面积来划分子流域。

2 研究实例

基于乌江流域 DEM,运用 Arc Hydro Tools 进行地表水文模拟分析主要包括 4 个流程:DEM 的预处理、水流方向的确定、汇流栅格图的生成、自动提取河网和子流域边界。

(1)DEM 的预处理:Arc Hydro Tools 采用 A-GREE^[7]算法来“burn-in”主干河网,该方法需要设定三个参数:缓冲区大小(栅格数)、平滑距离、陡降距离,首先根据设定的缓冲区大小生成河网缓冲区,然后按设定的陡降距离降低河道所在栅格的高程值,最后对缓冲区内栅格高程按设定的平滑距离进行平滑。用 ARC/INFO GRID 模块下的 FILL 命令来填洼,首先扫描 DEM 找出洼地,然后将洼地点的高程值设为与其相邻点的最小高程值,这样迭代直到填平所有的洼地。

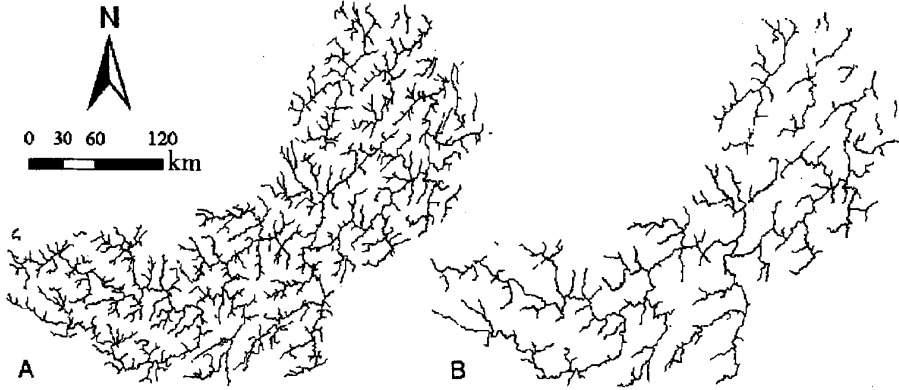
(2)水流流向的确定:DEM 经过填洼后,就成为一个具有“水文学意义”的 DEM 了,Arc Hydro Tools 调用 ARC/INFO GRID 模块下 FLOWDIRECTION 函数便可进行水流流向分析,生成流向栅格图。

(3)汇流栅格图的生成:Arc Hydro Tools 调用 ARC/INFO GRID 模块下的 FLOWACCUMULATION 函数生成汇流栅格图。应该指出的是,该函数采用的算法是以一些假定为基础的,其中最重要的假定是:所生成的河网是源于完全不透水和无植被区域上空间分布均匀的降雨事件^[8],即每一栅格有而且只有一个单位的水量可利用。该函数通过流向栅格图搜索水流路径,采用递归算法,从流域出口栅格开始递归搜索,计算出每一栅格单元的上游集水面积,即得到汇流栅格图。该集水面积的量值以栅格数目表示。

(4)自动提取河网和子流域边界:有了汇流栅格图,就可以用来生成流域河网。Arc Hydro Tools 通过设定一个最小水道集水面积阈值,将汇流栅格图中所有大于或等于该阈值的栅格提取出来,即得到了河网。河网详细程度由给定的最小水道集水面积阈值的大小决定,图 1 分别是最小水道集水面积阈值为 30 km²(3000 个栅格)和 100 km²(10 000 个栅格)时自动生成的河网。可以看出,最小水道集水面积阈值愈小,提取的河网愈详细,分级也愈多,河道的起始点愈向上游延伸;最小水道集水面积阈值愈大,提取的河网就愈稀疏,分级愈粗糙。最小水道集水面积阈值可以根据流域的气候、地形、地貌等特

征及所提取数据的用途来决定,当然也可以通过取不同的值进行试验来确定。笔者通过取不同值试

验,并结合后续研究对所提取数据的要求,确定最小水道集水面积阈值为 100 km²(10 000 个栅格)。



A. 阈值为 3000 个栅格;B. 阈值为 10000 个栅格
图 1 最小水道给养面积阈值对提取河网的影响

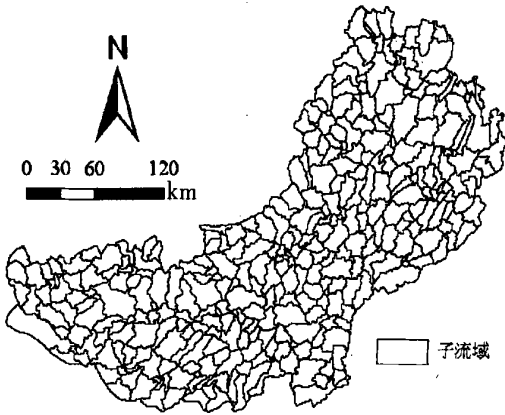


图 2 以河道交汇点为子流域出口时提取的子流域

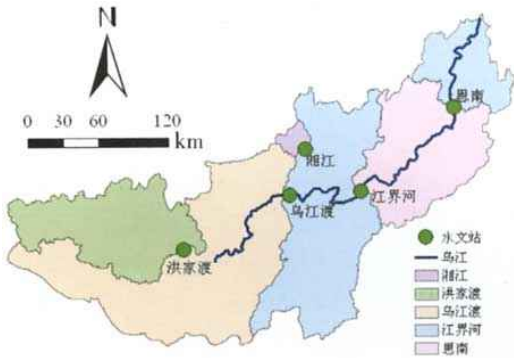


图 3 以水文站点为子流域出口时提取的子流域

当以两个河道的交汇点作为子流域出口时, Arc Hydro Tools 从出口沿河道向上游搜索每一河道的上游给水区,分别对搜索到的上游给水区边界进行勾画就得到了各个小流域的边界(图 2),生成的小流域个数与河道数一致,且一一对应,整个流域共划分出 378 个子流域。当以流域内已知地理位置的水文站点为子流域出口时, Arc Hydro Tools 提供 Point Delineation、Batch Watershed Delineation 两个工具来提取子流域的边界,提取的子流域如图 3。Point Delineation 工具按钮:在流域范围内任意位置点击此工具,就能在此处创建一个流域出口点并勾画出相应子流域边界。Batch Watershed Delineation 菜单函数:对于给定的一系列流域出口点,能批量的为每一个出口点勾画出相应子流域边界。

为了检验自动提取流域与实际流域之间的误差,对比图 3 中 5 个自动提取的子流域面积与实际量测结果(表 1)。可以看出自动提取的子流域面积与实际子流域面积非常接近,相对误差在 9% 以内,能达到 1:25 万水文数据的精度要求。

表 1 自动提取子流域面积与实际量测面积对比

子流域名称	自动提取子流域 面积/km ²	量测子流域 面积/km ² *	相对误差
湘江站以上	535	554	3.48%
洪家渡站以上	8678	9450	8.17%
乌江渡站以上	26165	27780	5.82%
江界河以上	40100	42299	5.20%
思南以上	49458	51270	3.53%

注:* 数据来源于贵州省水文与水资源局信息中心

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,进而以小流域为单位进行控制研究,是非点源污染研究的重要研究方法和手段。因此,子流域的划分为乌江流域非点源污染的控制研究提供了重要的数据平台。

3 结 论

本研究成功地运用 Arc Hydro Tools 和 DEM 进行了乌江流域水文模拟分析。

(1)分析结果表明,利用 Arc Hydro Tools 和 DEM 提取的河网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,且得到的数字水文数据可直接作为水文模型参数,可大大提高水文模型的效率,降低数据的获取成本。

(2)以流域内水文站点为子流域出口所提取的子流域很好地结合了乌江流域地表水监测断面,可充分利用现有的监测数据进行各子流域的水质监测,并为乌江流域土壤侵蚀、氮磷负荷空间分布的探

讨和流域非点源控制区划提供基础数据平台。

参考文献:

- [1] 吴险峰,王中根,刘昌明,刘晓伟. 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,徐雨清. 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] 李昌锋,赵锐. 流域水系自动提取在西苕河流域的应用[J]. 热带地理,2003, 23(4):319-323.
- [5] Mark D M. Automated detection of drainage networks from digital elevation models [J]. Cartographica, 1984, 21:168-178.
- [6] O'Callaghan F, Mark D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data [J]. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1984, 28:323-344.
- [7] Hellweger F. AGREE-DEM surface reconditioning system [EB/OL]. <http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/ferdi/ferdi/research/agree>, 1996.
- [8] Carrara A. Drainage and divide networks derived from high-fidelity digital terrain models [A]. NATO Advanced Study Symposium[C]. 1986.