

## 流域水系自动提取的方法和应用\*

李昌峰<sup>1,2</sup> 冯学智<sup>3</sup> 赵 锐<sup>1</sup>

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008;

2: 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3: 南京大学城市与资源学系, 南京 210093)

**提 要** 讨论由栅格数字高程模型 (DEM) 自动提取流域水系的原理和方法, 并以西苕溪中上游流域为研究区进行了河网生成实验. 研究表明: 在山地丘陵区 and 平均地形坡度不小于  $3^\circ$  的区域, 所生成河网具有很高的可靠性. 为了解决在平均地形坡度小于  $3^\circ$  的平坦区域河网生成中产生的虚拟河网与自然水系偏差较大的问题, 提出了利用主干河道和平原水系数字化作为约束条件的生成河网的方法, 取得了与实际情况比较接近的结果, 从而使水文要素的模拟更具有实际意义.

**关键词** 水系 DEM 自动提取 集水区面积阈值 流域

**分类号** P334+.91

### 1 基于DEM的流域水文建模研究

从 20 世纪 80 年代后期以来, 数字技术就促使一切科学技术发生着一场深刻的变革, 水文科学也正在经历着这样一场前所未有的洗礼, 水文科学与计算机及信息科学的交叉就形成了当前研究比较活跃的数字水文学<sup>[1]</sup>. 随着描述流域下垫面空间分布信息技术的日益完善, 流域地形、分水线、河网、子流域的表达和集水面积的计算都能用数字技术来实现, 流域水文模拟的研究方法也开始产生了根本性的变化, 分布式物理模型被广泛研究. 当前, 基于数字流域模型的产汇流理论的应用构成了数字降水径流模型, 模型的基本地形参数可以自动计算, 而且还可以方便的使用具有空间分布特征的遥感信息, 大大提高了水文模拟的效率, 丰富了模型的信息, 能够充分反映下垫面的空间分布不均匀对水文循环的影响<sup>[2]</sup>. 在流域水文模型的构建中, 利用数字高程模型(Digital Elevation Model) (DEM) 进行流域水文模拟并提取水文要素信息得到了众多学者的关注.

DEM 是描述地面高程值空间分布的一组有序数组, 能够反映一定分辨率的局部地形特征, 是目前用于流域地形分析的主要数据, 因此也就能根据地形的局部特征, 借助一定的算法, 进行一定地理空间范围内的水文模拟. DEM 通常有格网 (GRID)、不规则三角网 (TINs) 和矢量 (数字划线) (DLGs) 3 种形式<sup>[3]</sup>, 其中栅格 DEM 比较普遍, 计算处理方法简单有效, 且和遥感数据在结构上容易匹配, 在流域水文模拟中得到普遍应用<sup>[2]</sup>. 当前, 许多学者

\* 中国科学院知识创新工程重大项目 (KZCX1-SW-12-1-2)、领域前沿项目 (CXNIGLAS-A02-11) 联合资助.  
2002-12-15 收稿, 2003-05-19 收修改稿. 李昌峰, 男, 1972 年生, 博士研究生. E-mail: chfli@163.com

都致力于从栅格 DEM 中提取流域河网和分水线这两大地貌特征, 因为这两大特征是流域水文建模的主要参数, 是实现流域空间离散化的有效途径. 在 DEM 的基础上有多种比较成熟的提取流域水文要素信息的方法<sup>[4]</sup>, 所提取流域的数字特征包括确定单元格网的流向、汇流路径、河网间的拓扑结构等过程, 从而为水文模型提供下垫面数据的输入. 基于格网的地形分析技术在流域水文建模中的应用, 一般采用了 O'Callaghan 和 Mark 的坡面径流模拟方法<sup>[5]</sup>, Jense<sup>[6]</sup>, Garbrecht<sup>[7]</sup> 等在此基础上做了进一步的改进, 这种算法通常被称为 D8 算法, 后又有许多学者提出了多种确定水流流向的算法<sup>[8]</sup>, 如 Rho8, FRho8, TAPES-C 算法等. 不同的算法会产生不同的结果, D8 是比较传统的算法, 得到了较为广泛的应用.

基于 DEM 生成数字流域有多种成熟的软件可用, 通过这些软件, 可以方便的实现上述的一系列算法, 并可形成数字水文的地形基础. 常用的软件有, ESRI 提供的 Grid 模块, 可以在 Arc/info, Arcview 中直接调用; 美国陆军工程公司研制的 GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) 系统<sup>[9]</sup>; RSI 提供的 River Tools, 目前发展到 2.4 版本, 它的一个特点是可以处理很大的 DEM 数据; Garbrecht J., Martz L. W. 的 TOPAZ<sup>[10]</sup> (TOPographic PArameteriZation) 工具; 美国 Brigham Young 大学环境模型研究实验室开发的 WMS<sup>[11]</sup> (Watershed Modeling System) 软件; 以及 ArcView+Spatial Analyst<sup>[12]</sup> 等软件. 这些软件都可以进行空间任何地点的水流流向分析, 计算上游集水区面积, 生成流域河网, 进行流域分割及其它水文建模分析. 不同的软件包含着不同的算法, 生成的数字流域具有一定的差别. Rivertools、ArcView+Spatial Analyst 在可视化分析上要明显的优于其它软件, 但对大块平坦区的处理不尽人意. TOPAZ 算法完善, 但程序必须在 DOS 下运行, 运行结果必须导入到 GIS 系统里进行可视化显示, 程序操作比较复杂.

国内学者在基于 DEM 的数字水文建模研究中也作了大量的工作, 任立良等人利用 TOPAZ 进行了史灌河流域的水文模拟研究<sup>[13]</sup>; 李清河等人利用 D8 算法进行了径流路径的模拟<sup>[14]</sup>; 台湾学者廖学诚等人利用 DEM 进行了森林区径流路径的模拟<sup>[15]</sup>; 阎国年等人提出了基于栅格 DEM, 利用地貌形态组合的方法提取流域河网和分水线的新方法<sup>[16]</sup> 等.

## 2 基于栅格DEM提取流域自然水系

### 2.1 基本原理

从 DEM 中自动提取流域自然水系是依据水总是沿斜坡最陡方向流动的原理, 确定 DEM 中每一个高程数据点水流方向, 然后根据高程数据点的水流方向数据来计算每一个高程数据点的上游集水区, 再根据上游集水区的高程数据, 用阈值法确定属于水系的高程数据点, 最后, 根据水流方向数据, 从水系源头开始将整个水系追索出来<sup>[17]</sup>, 同时进行子流域的划分, 并对河网与子流域进行编码, 构建河网结构拓扑关系. 由 DEM 自动提取流域自然水系的模块化流程见图 1.

### 2.2 栅格DEM数据预处理

上述从 DEM 中自动提取流域自然水系的前提条件是: 在 DEM 中不能存在小平原和洼地等地形, 所有的水系都必须由斜坡构成. 否则, 所提取的水系通道是断断续续的. 而从地形图上数字化得到的栅格 DEM 包含有小平原和小洼地, DEM 数据的预处理就是将数据中的小洼地和平原改造成斜坡的延伸部分<sup>[18]</sup>. 在 DEM 中, 水流可以由一栅格点流入相

邻某一栅格点, 再由该栅格点流向另一个相邻的栅格点, 如果水流流入某栅格点后, 不能流向其他相邻栅格点, 那么该点即为 DEM 中的渗坑. 在实际操作中, 采用 3×3 模板 (图 2) DEM 中的渗坑, 即将模板沿扫描线方向移动, 如果模板中心栅格高程值满足条件:

$$p_0 \leq p_k (k=1, 2, \dots, 8) \quad (1)$$

则  $p_0$  即为渗坑. 将以上操作针对 DEM 中的所有扫描线逐条进行, 则可以检测出 DEM 中的所有渗坑. 对所有的渗坑采用填充和平滑处理的方法, 使凹陷点的高程值等于周围点的最低点的高程值, 同时消除栅格化和投影转换过程中高程数据重采样而产生的无值格网和凹陷点. 通过上述高程值修改过程, DEM 中所有栅格点的高程值均大于或等于最低出水口点的高程值, 这样就创建了一个具有“水文学意义”的 DEM, 保证了从 DEM 数据中提取的流域自然水系是连续的.

### 2.3 格网流向及水流聚集格网点的确定

经过预处理的 DEM 就可以用来计算格网内部的水流流向以及水流集聚点的上游集水区格网数, 算法一般采用传统的 D8 算法<sup>[19]</sup>. D8 算法可以这样描述, 依据水流总是沿斜坡最陡方向流动的原理, 一个栅格单元的水流流向可以定义为与之相邻近的 8 个格网点中坡度最陡的单元 (图 3). 坡度按下式计算:

$$q_{ij} = \arctg \left| \frac{h_i - h_j}{D} \right| \quad (2)$$

式中,  $h_i$  是栅格单元高程,  $h_j$  是相邻栅格单元高程,  $D$  为两个栅格中心之间的距离, 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 (图 4), 流动的 8 个方向分别用不同的代码编码. 为了具体说明, 建立了一个 5×5 的栅格数据模型 (图 5), 图中数字表示格网单元的高程值, 用以上计算坡度的方法循环处理每个格网点, 直到每个栅格点的水流流向都得到确定, 这样表示整个流域栅格单元之间连通性的水流方向栅格数据模型就建立起来了 (图 6). 图 6 中的箭头表示格网内水的流向 (为了直观, 用不同方向的箭头代替了编码值)<sup>[20]</sup>. 在每个栅格点流向确定的基础上, 通过计算汇聚到每个栅格点上的上游水流直接或间接流向该栅格点的栅格数目, 就确定了该栅格点的上游集水区面积, 从而建立了水流聚集点数据模型 (图 7).

### 2.4 生成流域河网

当栅格流向格网数据模型和水流集聚栅格数据模型建立之后, 就可以用来生成流域河网了. DEM 中某一个栅格点若能够形成水系, 则必须存在一定规模的上游给水区, 因此可以根据研究区的气候特征选择适当的上游给水区面积阈值, 并将上游集水区面积数值大

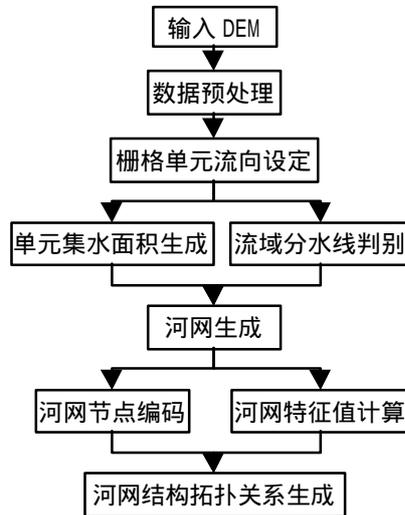


图 1 DEM 自动提取流域水系流程图  
Fig.1 Schematic diagram of automatically extracting stream network

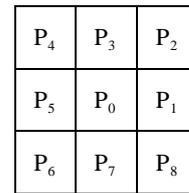


图 2 3×3 模板  
Fig.2 3×3 tem-

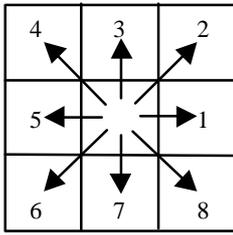


图3 中间单元格网的8个流向  
Fig.3 8-direction pour point

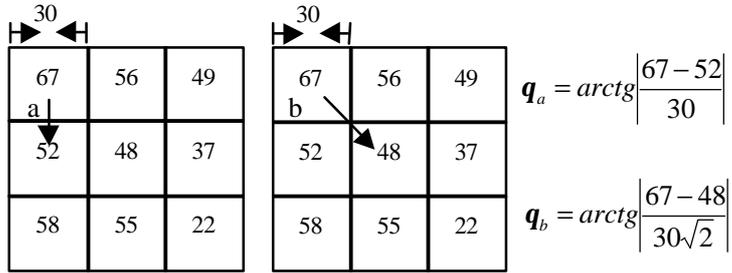


图4 坡度计算  
Fig.4 slope calculation

67	56	49	46	50
53	44	37	38	48
58	55	22	31	24
61	47	21	16	19
53	34	12	11	12

图5 高程格网示例  
Fig.5 A Grid of elevation

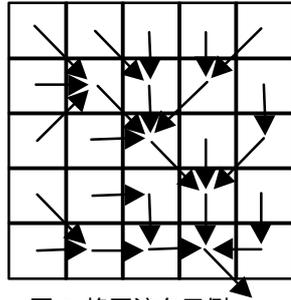


图6 格网流向示例  
Fig.6 Flow direction grid

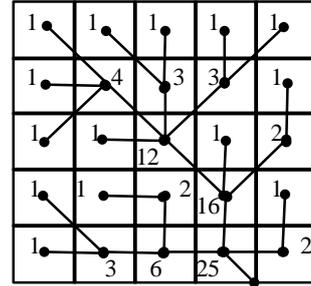


图7 水流集聚点格网示例  
Fig.7 Flow accumulation grid

于

或等于上游给水区面积阈值的栅格点标上水系栅格点标记(图8)。然后可以按Strshler的水系系统分级方案<sup>[21]</sup>对整个水系进行追索与分级。流域内上游集水区面积等于上游集水区面积阈值的格网点生成成为水道的起始点，大于上游集水区面积阈值的格网点生成成为水道<sup>[22]</sup>，从水系起始点开始，根据水流方向数据，向下游逐步追索 I 级水系，每追索出一个水系栅格点，就将Strshler水系分级数据“1”赋给该栅格点，当追索到水系交汇点时，交汇点的水系分级数据增加“1”，同时结束该段水系的追索，以上追索过程对每一个水系起始点逐个进行后，完成 I 级水系的追索。再从两个 I 级水系的交汇点开始，向下游追索 II 级水系，并将Strahler水系分级数据“2”赋于追索出来的水系栅格点，当追索到水系的交汇点时，检查与之交汇的水系是否为低级水系，如果是，就继续向下游追索。否则就结束该段水系的追索，并将当前栅格点的水系分级数据增加“1”，对每一个 II 级水系的起始点逐个进行后，完成 II 级水系的追索。重复相似的追索过程，就可以追索出所有高级别的水系，这样从水系源头开始将整个水系追索出来(图9)。

### 3 研究实例与改进方法

#### 3.1 研究区概况

研究区选择太湖流域西南部西苕溪中上游流域，大部分位于浙江省安吉县境内，流域面积 1696km<sup>2</sup>，属亚热带季风气候区，雨量丰沛，多年平均降雨量 1180mm。地貌以丘陵山地为主，地面起伏较大。流域南高北低，主要山脉呈西南东北走向。流域内丘陵低山约占 50%，高山约占 40%，河谷平原约占 10%，地貌类型齐全，有一定的代表性。北部梅溪附近的西苕溪河段为整个中上游流域的出口，高程为 4m，流域内最高峰为南部的龙王山，海拔 1587m，流域最大高差 1583m，平均坡降 25.4‰。流域内有两座比较大的水库，赋石

水库和老石坎水库. 整个流域河网比较发育, 主要支流有南溪、西溪、龙溪、浒溪和浑泥港 [23].

### 3.2 研究区DEM构建

研究区 DEM 是通过地形图手工数字化得到, 底图选用了 1974 年出版的 1:100000 比例尺的地形图, 等高线间距为 20m. 首先用 ARC 模块中数字化系统将地形图的等高线和控制点高程输入到计算机中,

每一等高线和高程点所代表的高程值赋为属性值, 应用 TIN 模块生成不规则三角网, 再经高程值内插, 最后生成栅格单元大小为 50m×50m 的 GRID(依据 GB/T 17941.1-2000, 数字高程模型质量要求).

### 3.3 上游集水区面积阈值对生成河网的影响

利用上述提取流域水系的方法和相关GIS软件, 对生成的DEM进行水系提取实验, 生成河网的详细程度可以通过给定河道上游集水区面积阈值来控制, 图10的a图和b图分别是上游集水区面积阈值分别为250hm<sup>2</sup>(1000个格网)和500hm<sup>2</sup>(2000个格网)时提取的流域自然水系. 可以看出, 上游集水区面积阈值越小, 提取的流域自然水系越详细, 河道的起始越向上游延伸. 在试验中得出: 当上游集水区面积阈值为所有栅格点上游集水区面积的平均值时, 提取的流域自然水网最理想(图10a).

### 3.4 DEM生成水系与实际水系比较

将基于DEM提取的流域水系(图10a)与从1:100000地形图上手工数字化得到的西苕溪中上游流域的河网(图11)相比较, 可以看出: 在丘陵山地和高山区由DEM提取的流域水网与实际的流域水网基本吻合, 但在水库与山谷平原区, 则差别较大, 其中最主要的是主干河道位置偏离自然河道的位置过大. 这是因为DEM本身可能就存在平坦的区域, 另外还有凹陷点填充后形成的平均区域, 直接利用D8算法, 在平坦区域内部无法生成河道, 而通过联接平地两端边缘的水流

聚集格网点生成与实际河道不符的伪河道. 处于平坦区的河流流动的随机性比较大, 自然水系往往是弯曲的, 有些河流的形状则呈辫状或不规则环状汇合形态, 这就意味着有些栅格点的水流方向是多方向的, 而D8算法是单流向算法, 这在计算栅格点的水流方向时是无法实现的. 并且在西苕溪中上游流域的山谷平原区有些人工开挖的河流渠道, 改变了河流的自然分布状态, 河流的分布与自然的地形不相符合, 所以由描述地表起伏的DEM提取的流域自然水系就与实际河网也不相符合了.

1	1	1	1	1
1	4	3	3	1
1	1	12	1	2
1	1	2	16	1
1	3	6	25	2

图 8 集水区面积阈值>10 个格网

Fig.8 Threshold > 10 cell

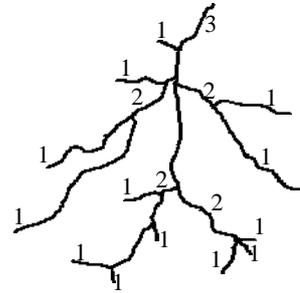


图 9 Strshler 水系分级系统

Fig.9 Strahler system for stream

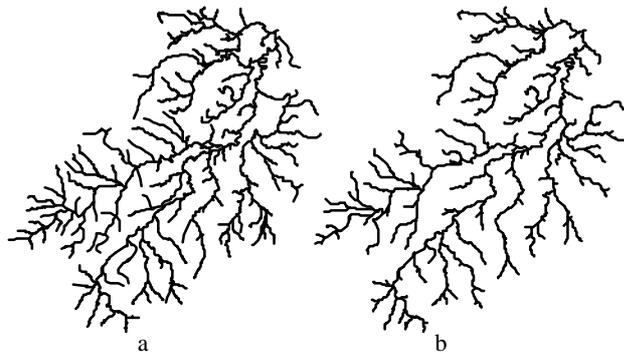


图 10 上游集水区面积阈值对生成河网的影响

Fig.10 The impact of size of threshold on hydrologic data derived from DEM

在ArcView软件环境下,利用Derive slope命令生成西苕溪中上游流域的地形坡度图,再与由DEM中提取的流域自然水网相叠加就可以看出,模拟中生成的与实际河网不符的河流大都处在平均地形坡度不大于 $3^{\circ}$ 的区域(图12中灰色部分).由此得出:当平均坡度大于 $3^{\circ}$ 时,由DEM提取的流域自然水网是与实际河网基本一致;当坡度小于 $3^{\circ}$ 时,由DEM中提取的流域自然水网与实际的水系有误差,需要进行纠正处理.

### 3.5 改进方法

为了解决DEM中平均地形坡度小于 $3^{\circ}$ 的平坦区域所生成的流域水系与实际河网有较大误差的问题,采用了主干河道和平原水系约束法.具体操作步骤如下:即通过手工数字化的方法将主干河道和平原水系输入计算机中,并利用Arc/info等地理信息系统软件将主干河道和平原水系转化成栅格形式,栅格的大小和建立的DEM的栅格大小相等,经过投影转换纳入到统一的坐标系中,通叠加运算,将主干河道和平原水系叠加到DEM上.根据自然水系主干河道和平原水系的位置,将DEM中与其相对应格网的中心点高程进行初始化处理,改变主干河道和平原水系经过的格网内高程值,使主干河道和平原水系的地势低于沿岸地势,使河网的生成在主干河道和平原水系的约束条件下完成,以确保生成河网的主干河道和平原水系与实际相符.以处理后的格网高程为初始条件按前面所述方法生成新的格网水流方向数据模型.再依据新的格网水流方向数据模型生成河网.图13所示即西苕溪中上游流域经主干河道和平原河网数字化技术处理后由生成的河网,由此可以看出,利用主干河道和平原河网数字化方法,可以使生成河网更加符合实际情况.

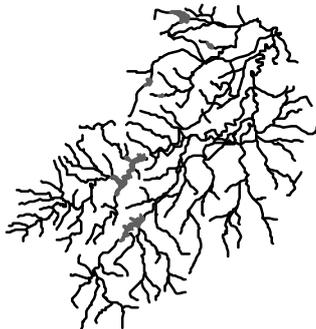


图 11 手工数字化河网  
Fig.11 The stream network of manual digitization



图 12 平均坡度 $<3^{\circ}$  区域  
Fig.12 Area of mean slope $<3$

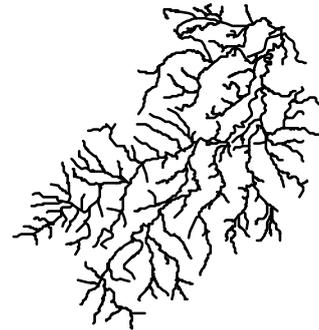


图 13 利用改进方法生成的河网  
Fig.13 Generated streams by the modified method

## 4 结论与讨论

(1) 利用DEM提取流域水系并构建河网结构拓扑关系,其相应的水文要素信息数据可以直接被水文模型所调用,不仅可以大大提高水文模拟的效率,而且还可以方便的利用遥感等数据源,丰富建模信息,并为分布式水文模型的研制提供了平台.

(2) 以西苕溪中上游流域为例,分析探讨了基于DEM自动提取流域水系的方法,在平均地形坡度不小于 $3^{\circ}$ 的区域所提取的流域水系具有很高的可靠性,基本上不需要进行纠正处理.

(3) 为解决在平均地形坡度小于 $3^{\circ}$ 的平坦区域河网生成中产生的虚拟河网与自然水

系偏差较大的问题, 提出了利用主干河道和平原水系数字化作为约束条件的生成河网的方法, 结果令人满意. 该方法既可应用于山地丘陵区, 也可应用于平原河网地区.

### 参 考 文 献

- 1 Singh V P. Kinematic wave modeling in water resource—environmental hydrology. New York: John Wiley & Sons, 1997, 1-10
- 2 吴险峰, 王中根, 刘昌明等. 基于 DEM 的数字降水径流模型—在黄河小花间的应用. 地理学报, 2002, 57(6): 671-676
- 3 Moore I D, Turner A K, Wilson J P, et al. GIS and land-surface-subsurface process modeling. In: Goodchild M F, Park B O, Steyaert L T, eds. Environmental with GIS. Oxford: Oxford University Press, 1993: 196-230
- 4 Tribe A. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method. Journal of Hydrology, 1992, 139(1/4): 263-293
- 5 O'Callaghan J F, Mark D M. The extraction of drainage network from digital elevation data. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1984, 28: 323-344
- 6 Jensen S K, Domingue J O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1988, 54(11): 1593-1600
- 7 Garbrecht J, Martz L W. The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models. Journal of Hydrology, 1997, 193: 204-213
- 8 Turcotte R, Fortin J P, Rousseau A N et al. Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. Journal of Hydrology, 2001, 240(3-4): 225-242
- 9 Srinivasan R, Arnold J G. Integration of a basin scale water quality model with GIS. Water Resources Bulletin, 1994, 30(3): 453-46
- 10 Garbrecht J, Martz L W. Topaz Overview. USDA-ARS, Grazingland Research Laboratory, 7207 West Cheyenne St, Reno, Oklahoma, 73036, 1999
- 11 E James Nelson. WMS v6.1 Tutorials Environmental Modeling Research Laboratory. Brigham Young University, Provo, Utah, 2001: 236
- 12 Environmental Systems Research Institute Inc. ArcView Spatial Analyst. Printed in USA. 1998:104-107
- 13 任立良. 流域数字水文模型研究. 河海大学学报, 2000, 28(4): 2-7
- 14 李清河, 李昌哲, 齐实等. 流域降雨径流路径的数字模拟技术. 地理研究, 2000, 19(2): 209-216
- 15 廖学诚, 黄琼, 漆升忠. 应用数值地形模型萃取上游森林集水区河川网路之研究. 水土保持研究, 1999, 6(3): 2-8
- 16 闫国年, 钱亚东, 陈仲明. 基于栅格数字高程模型提取特征地貌技术研究. 地理学报, 1998, 27(2): 133-137
- 17 Martz L W, Garbrecht J. An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM. Computers & Geosciences, 1999, 25(6): 835-844
- 18 陈永良, 刘大有, 虞强源. 从 DEM 中自动提取自然水系. 中国图像图形学报, 2002, 7(1): 91-96
- 19 Jensen S K. Application of hydrology information automatically extracted from digital elevation model. Hydrological Processes, 1991, 5(1): 31-44
- 20 李硕, 曾志远, 张运生. 数字地形分析技术有分布式水文建模中的应用. 地球科学进展, 2002, 17(5): 669-774
- 21 Strahler A N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. Trans Am Geophys Union, 1957, 38(6):

913-920

- 22 TANG Guo-an, HUI Yang-he, Josef Strobl, et al. The impact of resolution on the accuracy of hydrologic data derived from DEMs. *Journal of Geographical Sciences*, 2001, 11(4): 393-400
- 23 浙江水利志编纂委员会. 浙江水利志. 北京: 中华书局出版社, 1998: 105-123

## The Methods and Application of Automatically Extracting Stream Network of Watershed

LI Changfeng<sup>1,2</sup>, FENG Xuezhi<sup>3</sup> & ZHAO Rui

(1: *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China;*

*2: Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, P.R.China;*

*3: Dept. of Urbanology and Resource, Nanjing Univ., Nanjing 210093, P.R.China)*

### Abstract

At present, with digital terrain analysis technologies, calculating topographic information directly, modeling hydrological process and extracting hydrological data automatically from digital elevation models (DEM) is the focus of digital hydrology, and the present Geographic Information System (GIS) software based on raster data structure provide solid foundation for the modeling hydrological process, too. Automated extraction of drainage features from DEM is a very important research item of them, and has been widely used in actual works. The paper discussed the principles, methods and process of automated extraction of natural stream networks of watershed from DEM. The upper reaches watershed of Xitiaoxi as a case of study, a raster DEM is used to define surface drainage and extract the stream networks. Through comparing the stream networks delineated from DEM with the actual stream networks, it can be conclude that in the mountains area, especially the area of mean slope no less than 3 degrees, the delineated stream networks would be reliable. In the flat region of mean slope less than 3 degrees, the delineated stream is much different from the actual stream networks. In order to solve the problem, we put forward the restricted river channel method by digitizing the trunk streams and the flat land rivers. With the method, we got the delineated steam networks same as the actual stream networks, and make the simulation of hydrologic factor has more practical value. The method has universal reference value for hydrological modeling of other watersheds, and can improve the efficiency of hydrological modeling obviously.

**Keywords** Stream networks; DEM; automated extraction; threshold of flow accumulation; watershed