

# 基于 DEM 的水系自动提取与分级研究进展

孙崇亮<sup>1,2</sup>, 王卷乐<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘 要** 随着信息化技术的快速发展, 基于 DEM 产品提取水系等数据已经变得不再困难, 但是, 目前无论在水系自动提取方面还是自动分级方面, 都存在很多需要改进之处。论文分析了自动提取河网水系与流域边界, 以及河网水系分级的研究进展, 在此基础上总结了当前存在的问题: (1) 水系自动提取中的洼地处理、平地区域流向处理等; (2) 河网水系自动分级方法中的参数单一, 准确性较差, 并且缺少水系实体之间的互相关联关系等问题。在此基础上, 提出了基于地理特征建立水系分级模型以解决分级问题的构想。

**关 键 词** 水系提取; 水系分级; 进展; 模型

## 1 引言

DEM 的概念由 Miller 于 1958 年提出, 经过 40 多年的发展, 作为一种独立产品的 DEM 已经在一定程度上替代了等高线在传统地形图中的作用, 其应用正在越来越广泛地受到人们的重视, 对 DEM 数据产品的评价方面也进行了相关研究<sup>[1]</sup>。水文水系数据是地理科学数据的核心之一, 作为地学领域数据的一个重要组成部分, 是支撑相关地学研究的基础性数据。随着计算机在科研工作中的广泛应用, 电子版的数据已经变得越来越重要, 但目前采用的电子版水系大多却仍然来自于地形图和水系图纸。这种情况往往会导致工作效率低下, 所以在信息技术的支持下提高基于 DEM 自动提取河网水系与流域边界及其分级方法的精度变得非常迫切。本文总结了提取河网水系与流域边界、及水系自动分级方法的研究进展, 分析其存在的问题, 提出了基于特征建立水系分级模型以解决分级问题的构想。

## 2 提取河网水系与流域边界研究进展

基于 DEM 进行水系及流域边界自动提取是当前的一个研究热点, 国内外出现了多种提取方法,

这些方法各有所长。本节从以下几个部分具体分析了水系自动提取方法的当前研究情况: (1) 几种典型的水系与流域边界提取算法分析; (2) 以当前应用较广泛的 DEDNM (Digital Elevation Drainage Network Model) 方法为代表, 分析此方法的典型步骤, 详细分析目前尚存在较多问题的两个环节, 即 DEM 数据的预处理、基于 DEM 数据的流向确定等。

数字高程模型在流域特征提取方面的应用很广泛, DEM 的分辨率与取样方式等基础因素对水文特征的提取存在一定的影响。栅格 DEM 的水平分辨率对流域特征影响的主要结论有: 空间分辨率的改变与 DEM 重新取样方式都会对水文模拟产生重要影响, DEM 水平分辨率网格的增大会导致增加平地流向的随意性, 由不同分辨率的 DEM 得到的流域面积、河网结构、高程等空间参数差别不大, 而坡度相关的参数则变化明显<sup>[2-4]</sup>。

目前, 基于 DEM 提取流域河网主要有四种不同算法: 移动窗口算法、坡面径流模拟算法、谷线搜索算法<sup>[5]</sup>、从 DEM 直接提取河网与划分子流域的方法 (AEDNM: Automated Extraction of Drainage Network Model)<sup>[6]</sup>。在这些算法的基础上, 国内外出现的从 DEM 自动提取河网方法也主要有四种:

(1) 辨别谷地并连接成河网。该法是由 Grey-sukh、Peucker<sup>[7]</sup>、Douglas 等人提出, Band、Carrol、Tribe

收稿日期: 2007-05; 修订日期: 2007-12。

基金项目: 国家科技基础条件平台建设项目 (2005DKA32300)。

作者简介: 孙崇亮 (1979-), 男, 汉族, 博士研究生, 主要从事遥感与地理信息系统应用研究。E-mail: sundl@reis.ac.cn

等人后来对其进行了改进<sup>[7,8]</sup>。其核心思想是找出DEM中的谷地单元并将其连接形成河网。所谓的谷地单元即是周围有某些相邻单元高度大于该单元的单元<sup>[9]</sup>。该法计算简单,但谷地单元有时候不具连续性,导致不能生成连续的河网,也就不能很好的识别大面积平地。

② 辨别流向信息并连接河网。O'Callaghan和Mark<sup>[10]</sup>针对以上方法不能提取出连续河网的问题,提出了一种能提取连续河网的新算法,即坡面径流模拟法。坡面径流模拟算法的实现主要分四步:确定水流离开DEM中每一栅格单元的方向;通过流向确定水流累积矩阵进而计算每一栅格单元的上游汇水面积;确定一个最小水道集水面积阈值;将所有水流累积值大于该阈值的点连结起来即是河网,得到流域边界及子流域。著名的数字高程流域水系模型DEDNM(Digital Elevation Drainage Network Model)<sup>[11]</sup>等就是基于这种方法实现的,他们提出了DEM数据的预处理方法、水流方向确定方法、汇水面积确定方法、水系生成与分级方法等。后来一些学者又对DEM进行填洼处理来消除洼地影响,通过抬升平地来避免产生大量不合理的平行河网<sup>[11,12]</sup>。但填洼时无法区分洼地的真伪,易人为造出大片的平地,改变原始的DEM,使提取的河网与实际河网误差很大。

③ 搜索谷线并连接成河网。Yoeli<sup>[14]</sup>提出了谷线搜索算法,该算法的主旨是由DEM最低点沿河谷向上坡逐步搜索,以确定河网。该法的计算步骤有:首先用一个样条曲线函数找到DEM中的所有最低点,然后从这些高程最低点生成谷线,每条谷线起始于这些高程最低点中没有参与生成谷线的高程最大值,将其延伸到与其最近的高程低值点,重复这样的操作直到该谷线碰到别的谷线,如湖泊或海洋,重复以上步骤直到遍历所有高程最低点<sup>[5]</sup>。

④ 综合坡面流算法与搜索谷点算法的特点,叶爱中<sup>[9]</sup>等提出新的从DEM直接提取河网与划分子流域的方法(AEDNM)。该方法与以往方法的不同之处在于不再对DEM进行填洼处理,而是结合图论与水文学的思想,直接在原始DEM的基础上从流域的出口直接向上游搜索,在搜索过程中根据DEM的特点自动进行邻域处理、得到一个处理过的DEM,通过图的遍历来确定流向,根据D8算法得出水流的流向、水流累计矩阵,使全流域形成一个有向无环图,这样提取的河网可以保证是连续

的,同实际河网误差很小。

## 2.1 DEM数据的预处理

从数字高程模型自动提取水系的过程中,最复杂的部分应该是对DEM数据中洼地的处理<sup>[12]</sup>。洼地处理的质量直接决定着提取的水系与自然水系的接近程度,国内外很多专家都对此进行了大量的研究。

### 2.1.1 国外研究进展

在国外,关于洼地与平坦区域的处理主要有如下两方面。

(1) 地形中的洼地的处理方法。通常由栅格型DEM自动生成河网是采用O'Callaghan和Mark<sup>[10]</sup>提出的坡面流模拟方法,建议采用平滑DEM数据的方法处理洼地,但应用时会遇到凹陷区域与平坦区域水流方向的确定问题。Jenson和Dominique<sup>[15]</sup>、Martz和DeJong<sup>[16]</sup>采用垫高填平的方法处理凹陷区域,将凹陷处垫高至周边最小高程。该方法的缺点是仍然会产生伪平行河道。而Garbrecht和Campbell<sup>[13]</sup>提出了与以往不同的处理方法,他们将洼地分为两种类型:凹陷型洼地和阻挡型洼地,凹陷型洼地是指一组栅格单元的高程低于其四周,而阻挡型洼地是指垂直于排水路径方向有一条狭长带栅格单元的高程较高,类似于横跨河道的障碍物或坝体。对于阻挡型洼地,采用降低阻挡物存在处的高程的方式,使水流穿过障碍物,对于凹陷型洼地,采用常规的垫高法,将洼地内所有栅格单元垫高至洼地周围最低栅格单元的高程。

(2) DEM中平坦区域的处理方法。对DEM原先存在的或经过垫高产生的平坦区域,Martz和Garbrecht<sup>[11]</sup>采用高程增量迭加算法设定平坦格网内的水流方向,即通过平坦栅格单元数字高程的微调(增高)产生整个研究区域内合理的汇流水系,这种处理方法避免了任意设置排水路径的弊端。Garbrecht和Martz<sup>[17]</sup>提出了另一种新方法,该方法基于这样一个认识:即在自然景观中排水网络通常是远离高地形朝向低地形。为了产生这样一个排水网络,平坦区域DEM的高程值将被改变以产生两个坡度:一个远离高地形,一个朝向低地形。该方法对平坦区域“平行流”问题有很大的改进<sup>[9]</sup>。

### 2.1.2 国内研究进展

在国内,从规则格网DEM自动提取汇水区域及其子区域对DEM数据中洼地的处理方法主要包括如下两种:

(1) 在国外处理方法基础上提出一种改进算法,以提高处理效率。朱庆<sup>[18]</sup>提出并实现了一种在现有地表水流模拟方法的基础上将矢量操作与栅格操作结合起来对规则格网 DEM 中的洼地进行填平处理的方法。李清河等<sup>[19]</sup>利用栅格化的 DEM 与实际地形相结合的方法,对流域内洼地与平地进行处理。周贵云等<sup>[12]</sup>采用提升原始洼地地形的做法来处理洼地。陈永良等<sup>[20]</sup>将其中的洼地和小平原改造成斜坡。李本纲等<sup>[21]</sup>提出了伪负地形填充法,可以区别真正的负地形和由于 DEM 误差造成的假象,并对伪负地形进行填充。孔凡哲等<sup>[22]</sup>提出了一种新的洼地与平坦区处理方法,通过增加输入地形高程信息,避免了 DEM 中平坦区域和闭合洼地的生成,从而使由 DEM 生成的河网与实际河网能够精确拟合。

(2) 根据分类的类型,区分出需要改进的洼地后再填充的方案。谢顺平等<sup>[23]</sup>提出了一种洼地的分类与归并、有效填洼、平地的分类、基于出流代价的河谷平地排水流向构建等新的处理方法,在此基础上提出了洼地处理的一套新嵌套填平法。闫国年等<sup>[24]</sup>将地表定义为平地、洼地和坡地 3 种类型,其中平地分为台地、阶地和低洼平地,洼地分为孤立洼地和组合洼地,并根据此分类方法进行洼地与平地的处理。

## 2.2 流向确定的研究

流向判断的方法有单流向法和多流向法两种,是建立在  $3 \times 3$  的 DEM 基础上的对水流方向进行判定的方法。目前,关于水流方向的确定有两种方法:单流向法与多流向法,其中单流向法主要包括 D8 方法、Rh08 方法、Lea 方法、DEMON 方法、D 方法等<sup>[25]</sup>。应用比较广泛的是 D8 方法和多流向法。

### (1) 单流向法

单流向法将某单元格上产生的径流只流向基于  $3 \times 3$  DEM 网格中一个最低的相邻单元格,然后根据网格高程判断水流方向,再由得出的流向栅格进行更进一步的信息提取,如河网、边界线、子流域长度和坡度等。目前应用最广泛的单流向法是 D8 法,此外,还有 Rh08 方法、DEMON 法和 D 法等。

D8 (Deterministic eight-neighbours) 流向确定法假设单个网格中的水流只有 8 种可能的流向,即流入与之相邻的 8 个网格中。它用最陡坡度法来确定水流的方向,即在  $3 \times 3$  的 DEM 网格上,计算中心网

格与各相邻网格间的距离权重差(即网格中心点落差除以网格中心点之间的距离),取距离权重差最大的网格为中心网格的流出网格,该方向即为中心网格的流向。

D8 算法在三种情况下确定栅格流向会出问题:栅格有两个或多个可能的流向;在平坦区域处;在闭合洼地处<sup>[9]</sup>。对于栅格有两个或多个可能流向的问题,O'Callaghan 和 Mark<sup>[10]</sup>,Skidmore<sup>[26]</sup>建议选择顺时针从正北方向开始最先碰到的方向;对两种可能流向的情况,Jenson 和 Dominique<sup>[15]</sup>也采用了类似的方法,而对于有两种以上可能流向的情况,如有三种相邻的可能时,则选择中间的方向;Morris 和 Herdegen 则使用与可能流向相邻栅格的坡度值大小来确定流向的方法。Bevaqua 和 Floris 在谷线上选择使弯曲可能最小的方向<sup>[9]</sup>,Fairfield<sup>[27]</sup>等也提出了 Rh08 方法来解决这一问题。而对于平坦区域和洼地,则采用 DEM 预处理方法先对其进行处理,然后再进行流向判断。

### (2) 多流向法

多流向法将径流按一定的比例流向基于  $3 \times 3$  的 DEM 网格中若干相对较低的相邻单元格。根据所采用的水流分配策略,秦承志<sup>[28]</sup>等将现有的 MFD (Multi-Flow Direction) 分为四类:(a) 固定水流分配权重的 MFD;(b) 水流分配权重随汇流面积变化的 MFD;(c) 水流分配权重随局域地形特征变化的 MFD-fg;(d) 基于局域形态单元的 MFD。从模型合理性、算法复杂度和易用性,对 DEM 误差的敏感性等方面进行的分析表明,水流分配权重随局域地形特征变化的 MFD 明显优于其他三类 MFD。水流分配权重随局域地形特征变化多流向算法的基本思想是水流分配策略应在空间上随着与下坡坡度相关的地形参数而变,从而地形对水流分配的影响可以得到合理、有效的建模。

## 3 河网水系分级的研究进展

流域水系河网自动分级技术有多种,其中较为流行的有 Strahler 法和 Shreve 法,并且被 ESRI 公司开发的 ArcGIS 软件采用。水系网结构最基本的是分枝和汇合,具有一定的自相似性,Horton 在研究流域侵蚀发育的定量形态时提出了水系的组成定律<sup>[29]</sup>,即 Horton 定律。水系具有和谐的等级和空



间特征,其结构特征和数量关系可用 Horton 定律进行描述,Horton 定律的定量表述涉及到河道等级的划分方案。

### 3.1 Horton 编码

水道组成的 Horton 定律表明水流在重力作用下随机发育的必然结果。其基础是关于“水道等级”

为中心的水道数目分配,Horton 提出河流的主流为 Horton 码最高级 ( $N$  级),即主流的次一级支流为 Horton 码  $N-1$  级,依此类推,最小的不分枝的支流为第一级。河流的 Horton 码是基于河流实体组织的,不同级别的河流实体根据主流的关系确定不同的级别。

按 Horton 的定义原则,最小的不分枝的支流为

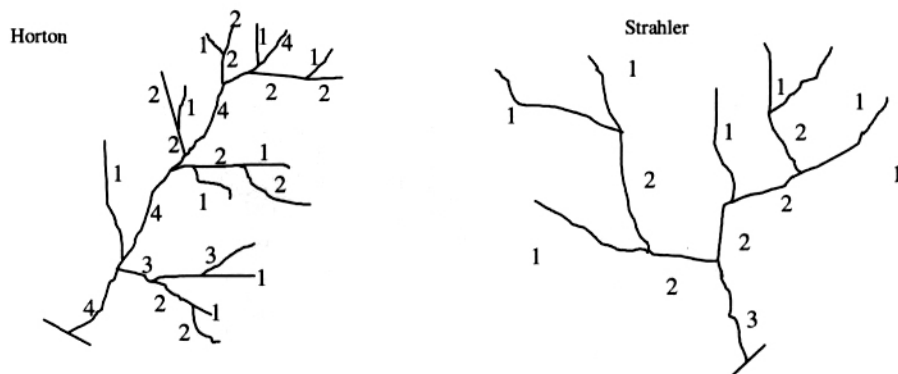


图 1 Horton 编码与 Strahler 编码示意

Fig.1 Sketch map of Horton coding & Strahler coding

第一级,主流为最高级,树状水系 Horton 码主要有以下几个方面特点(如图 1)。

(1) Horton 码是针对河流地理实体进行的编码。

(2) Horton 码反映河流等级体系关系;河流的 Horton 码与河流的主流到支流形成对应的等级体系关系。河流主流对应于 Horton 码最大值,呈“叶结点”的最小一级支流对应的 Horton 码为 1。

(3) Horton 码反映河流子树深度,Horton 为  $N$  的河流有  $N-1$  级子树,因此,在相邻接情况下,Horton 码为  $N$  的河流是 Horton 为  $N-1$  之父,所有 Horton 码为  $N-1$  的河流是 Horton 码为  $N$  之子。这样可以确定河流之间的父子关系。

### 3.2 Strahler 编码

Strahler 发展了 Horton 学说,特征值由水道数目和长度(Horton,1945),扩展到流域面积、纵比降、周边长等,它们随水道级别而呈几何级数变化。按照 Strahler 的序列划分原则<sup>[30]</sup>,在理想的树枝状的水系中,包括所有间歇性及永久性的水道在内,只要它们具有十分明显的稳定性谷地,都可以根据序列的命名原则,将其大小进行分级。凡是属于顶端末梢,不再分枝的而且具有明显的槽床者,称之为

第一级水道,凡是由两个以上的第一级水道汇合后组成的称之为第二级水道,依此类推,直到把全部河槽划分完毕为止。但是,必须指出,第一级水道可以汇入第二级水道,也可以汇入第三、第四、甚至更高级水道。水道的序列,不仅反映水道大小上的差别,而且反映了水文性质上的形态特征上的差别。如图 1。

### 3.3 Shreve 编码

按照 Shreve 编码的序列划分原则,在理想的树枝状的水系中,同样包括所有间歇性及永久性的水道在内,只要它们具有十分明显的稳定性谷地,都可以根据序列的命名原则,将其大小进行分级。凡是属于顶端末梢,不再分枝的而且具有明显的槽床者,称之为第一级水道,由两个第一级水道汇合后组成的称之为第二级水道,由两个或者以上同级别的水道  $N$  汇合组成更高级别的水系  $N+1$  级水道,如果不同级别的水道汇合, $M$  级水道与  $N$  级水道汇合,且  $M>N$ ,则形成的水道的级别与原水道中级别较高的水道为同一级别,即为  $M$  级,依此类推,直到把全部河槽划分完毕为止<sup>[31]</sup>。编码原理如图 2。

### 3.4 Garbrecht 于 1988 年提出的河流分级方法

该方法与 strahler 等提出的方法不同,其思路是从河流的出口断面开始靠左向上检索,直到检索到河流的起始点为止。然后在此基础上再逆向检索,直到遇到新的节点或水道起始点为止,同时按照递增规则编码,依次类推,直到搜索到流域出口断面为止。其编码思想为:如果流域出口断面编码为 1,则向上游搜索汇入的河段数,如果有一条或两条新河段汇入,则代码加 1;如果有两条以上河段汇入,则代码加  $N-1$ 。

### 3.5 Pfafstetter 分级编码方法介绍

巴西工程师 Pfafstetter 借助于 GIS 技术对大流域进行划分与编码。修正实测河道上部分栅格单元的高程,以避免大面积“伪洼地”的出现,从修正后的 DEM 提取出与实测河网比较一致的模拟河网。提取出模拟河网后,再进行河网的编码,以及流域的划分与编码。在此基础上,罗翔宇等<sup>[32]</sup>又提出了

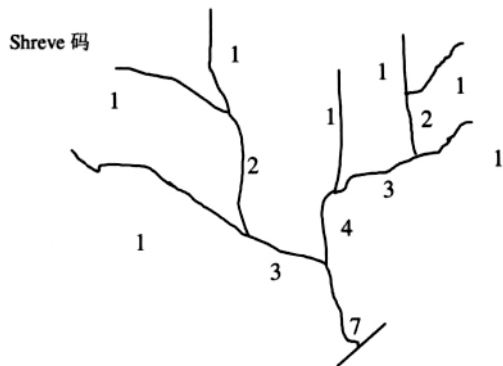


图 2 Shreve 编码示意

Fig.2 Sketch map of Shreve coding

一种对 Pfafstetter 规则的改进方法,并且按照改进后的 Pfafstetter 规则来对河网与流域进行编码,将提出的方法应用于黄河流域。Pfafstetter 编码方法如图 3。

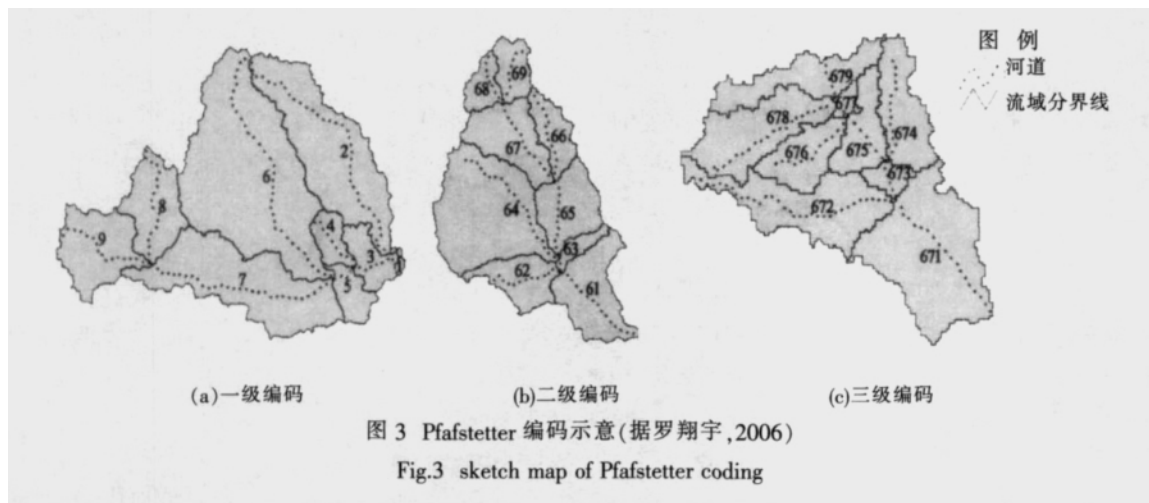


图 3 Pfafstetter 编码示意(据罗翔宇,2006)

Fig.3 sketch map of Pfafstetter coding

以上编码方法中,Strahler 编码与 Shreve 编码是从 DEM 数据提取水系常用的分级方法,例如 ArcGIS 中的水文分析模块就用到以上两种分级方法,Garbrecht 分级方法与 Pfafstetter 方法也在一些水文分析软件有相应的应用,但用这些方法确定干流时采用的是单一的流域面积这一指标,导致有时会出现较大误差。

## 4 基于地理特征建立水系分级模型以解决分级问题的构想

### 4.1 当前存在的难点问题

基于 DEM 数据自动提取水系及分级的方法中仍然存在以下问题:

(1) 基于 DEM 自动提取水系及流域边界的过程中存在一些问题,主要是洼地处理、平地区域流向处理,比如平原地区的平行流问题、黄河下游的地上河提取问题等。特别是平原区,由于地形起伏不大,仅由 DEM 很难直接确定流向,往往需要人工导入实际河网才能完成。

(2) 目前水系自动编码的方法从各自的着重点对水系进行编码,虽然可以生成完整的水系数据,但这些方法导致产生的水系分级代码存在的问题。Horton 编码方法由于提出的年代较早,没有考虑自动提取的水系特点,Strahler 编码是 Horton

编码的扩展,效果得到了一定的改进,但仍不太完善。Shreve 编码则是另外一种全新的编码方法,同样较难完全适合传统的分级编码思想。Pfafstetter 编码方法是与实际比较接近的,但直接给出水系等级也不明显。具体表现在:

(a)目前的水系分级方法导致基于 DEM 数据生成的水系分级数据难与传统的地形图、水系图等吻合。

(b)水系分级过程中参考因素单一,有时会导致分级生成的数据精度不够。

(c)现有流域水系提取、分级方法缺乏地理特征的概念,使得水系与其它地理特征之间很少有关联,打破了地理实体之间的相互联系。

#### 4.2 基于地理特征建立水系分级模型以解决分级问题的研究思路

水系自动提取方面,主要研究应集中于洼地流向确定、平原地区平行流问题的改进,特别是平原区,由于地形特点,可以结合人工导入实际河网的方法帮助确定流向,以提高水系的精度。水系自动分级方面则要着重于分级方法的改进,本文的水系提取利用 DEDNM 方法进行,方法上未进行改进,主要适用于地形起伏较大的地区,并依此方法提取的水系数据为基础进行分级。

在很大程度上,影响水系沿岸城市发展规模的主要因素之一是其水系流量的多少,也就是水系干流与支流的区别之一。这就是在自然因素的基础上,延伸出了很多社会因素,如人口数量、社会经济、城市规模等。即可以根据人类活动对流域自然情况的依赖性,进而反推流域的自然状况。在水系分级的过程中,考虑将人文和其他一些自然因素空间化后添加到模型中,构建基于地理特征的水网矢量数据结构,并在此基础上与原有的分级方法进行综合,分析权重,形成水系自动分级方法,建立水系自动分级数据模型。笔者认为这将是目前水系自动分级的研究方向之一。

#### 参考文献

- [1] 李爽,姚静. 数字地形模型数据产品特点与评估分析. 地理科学进展, 2005, 24(6):99~108.
- [2] 吴险峰,刘昌明,王中根. 栅格 DEM 的水平分辨率对流域特征的影响分析. 自然资源学报, 2003, 18 (2):148~154.
- [3] 张雪松,郝芳华,杨志峰. 径流模拟对 DEM 分辨率的敏感性分析. 水土保持通报, 2004, 24(1):32~36.
- [4] 郝振纯,池宸星. 空间分辨率与取样方式对 DEM 流域特征提取的影响. 冰川冻土, 2004, 26(5):610~615.
- [5] 唐从国,刘丛强. 基于 DEM 提取流域河网研究. 辽宁工程技术大学学报. 2006, 25(增刊):313~315.
- [6] 叶爱中,夏军,王纲胜,王晓妮. 基于数字高程模型的河网提取与子流域生成. 水利学报, 2005, 36 (5):531~537.
- [7] Peucker T K, Douglas D H. Detection of surface-specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data. Computer Graphics and Image Processing, 1975, (4): 375~387.
- [8] Band L E. Topographic partition of watersheds with digital elevation models. Water Resources Research, 1986, 22(1): 15~24.
- [9] 孔凡哲,芮孝芳. 数字高程模型在流域水文模型应用中的若干问题. 水文, 2002, 22(5):1~4.
- [10] O'Callaghan J F, Mark D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1984, 28:323~344.
- [11] Martz W, Garbrecht J. Numerical definition of drainage Network and subcatchment Areas from digital elevation models. Computers&Geosciences, 1992, 18(6):747~761.
- [12] 周贵云,刘瑜,邬伦. 基于数字高程模型的水系提取算法. 地理学与国土研究, 2000, 16(4):77~81.
- [13] 任立良,刘新仁. 数字高程模型在流域水系拓扑结构计算中的应用. 水科学进展,1999,10(2):129~134.
- [14] Yoeli P. Computer-assisted determination of the valley and ridge lines of digital terrain models. International Yearbook Cartographica, 1984, (24): 197~205.
- [15] Jensen S K, Domingue J O. Extraction topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1988, 54(11):1593~1600.
- [16] Martz W, DeJong E. Catch: a Fortran program for measuring catchment area from digital elevation models. Computers&Geosciences, 1988, 14(5):627~640.
- [17] Garbrecht J, Martz L W. Automated channel ordering and node indexing for raster channel networks. Computers&Geosciences, 1997, 23(9):901~906.
- [18] 朱庆,赵杰,钟正等. 基于规则格网 DEM 的地形特征提取算法. 测绘学报, 2004, 33(1):77~82.
- [19] 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.
- [20] 陈永良,刘大有,虞强源. 从 DEM 中自动提取自然水系. 中国图象图形学报, 2002, 7(1):91~96.

- [21] 李本纲, 陶 澍. 用数字高程模型进行地表径流模拟中的几个问题. 水土保持通报, 2000, 20(3):47~49.
- [22] 孔凡哲, 芮孝芳. 处理 DEM 中闭合洼地和平坦区域的一种新方法. 2003, 14(3):290~294.
- [23] 谢顺平, 都金康, 王腊春. 利用 DEM 提取流域水系时洼地与平地的处理方法. 水科学进展, 2005, 16 (4):535~540.
- [24] 阎国年, 钱亚东, 陈钟明. 流域地形自动分割研究. 遥感学报, 1998, 2(4):298~303.
- [25] 孙友波, 宫辉力, 赵文吉, 赵宝奎. 基于 DEM 的数字河网生产方法的浅议. 首都师范大学学报 (自然科学版), 2005, 26(2):106~111.
- [26] Skidmore A K. Terrain position as mapped from a gridded digital elevation model. International Journal of Geographical Information Systems, 1990, 4:33~49.
- [27] Fairfield J, Leymarie P. Drainage networks from grid digital elevation models. Water Resources Research, 1991, 27 (5):709~717.
- [28] 秦承志, 李宝林, 朱阿兴 等. 基于栅格 DEM 的多流向算法述评. 地学前沿, 2006, 13(3):91~98.
- [29] 罗文锋, 李后强 等. Horton 定律及分枝网络结构的分形描述. 水科学进展, 1998, 9(2):118~123.
- [30] 赵春燕. 水系河网的 Horton 编码与图形综合研究. 武汉大学硕士学论文. 武汉, 2004.
- [31] 许宝荣, 杨太保. 基于 DEM 的干旱区河网系统模拟尺度影响分析. 兰州大学学报 (自然科学版), 2006, 42(1): 27~32.
- [32] 罗翔宇, 贾仰文, 王建华 等. 基于 DEM 与实测河网的流域编码方法. 水科学进展, 2006, 17(2):259~264.

## The Progress on Automatic Basin Streamline Extracting & Classifying Methods Based on DEM

SUN Chongliang<sup>1,2</sup>, WANG Juanle<sup>1</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101;

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract:** With rapid development of the modern information technology, it is not a problem to extract waterlines automatically based on DEM products. However, there exist many problems to be solved whether on the current automatic water streamline extracting methods or on the current classifying methods based on DEM. The singularity of the classifying parameters leads to a lower precision of the water-streamline classifying order result, as well as a lack of interknit between waterlines. On this background, this paper analyzes the progresses on the study of automatic basin streamline extracting & classifying methods. At the same time, this paper concludes the current problems with the waterline auto-extracting methods based on DEM, such as the problems for disposal of the sink and plateau areas, as well as the problems with the waterline auto-classifying methods, such as mis-match between the newly produced results and the traditional maps. Last, the paper puts up the idea of constructing the waterline auto-classifying model based on FBGIS in order to solve the problems of current waterline auto-classifying methods.

**Key words:** waterline extracting; waterline classifying; progress; model