

基于DEM的数字流域特征提取研究进展

宋晓猛^{1,2}, 张建云^{1,2}, 占车生³, 刘九夫^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程国家重点实验室, 南京 210029; 2. 水利部应对气候变化研究中心, 南京 210029; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘 要: 数字高程模型(DEM)是地表形态高程属性的数字化表达, 利用流域DEM数据构建数字水系模型并提取流域水文特征, 是分布式水文过程模拟的重要基础。DEM中闭合洼地和平坦区域的处理、流向的确定以及DEM分辨率的大小都直接影响着流域水系特征提取的质量与效率。针对当前基于DEM提取河网与流域特征的诸多问题, 阐述了DEM数据提取流域水系特征的原理, 回顾了数字水系模型与流域特征提取方法, 评述了洼地和平地的处理方法及水流方向的确定方法的研究进展, 介绍了当前基于不同DEM数据类型的提取方法研究, 探讨了DEM尺度和分辨率对提取流域特征的影响, 总结了平缓区域数字水系和河网提取的研究进展。

关 键 词: 数字高程模型; 数字流域; 河网提取; 评述

doi: 10.3724/SP.J.1033.2013.00031

1 引言

流域水文模型是研究水文自然规律和解决水文实践问题的主要工具(宋晓猛等, 2010, 2011), 而流域水系特征是流域水文建模的主要参数, 是水文模型分析的基础数据, 因此流域水系特征的提取一直是水文科学研究中的热点(许捍卫等, 2008)。随着数字技术和系统理论不断发展, 水文科学与数字技术和信息科学的交叉形成了一门科学——数字水文学, 而数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)的出现也为数字水文学的发展和数字水文模型的诞生提供了坚实的技术基础。自20世纪60年代, 特别是90年代以来(李丽等, 2003), 由DEM自动获取水系和子流域特征, 代表着流域参数化迅速发展阶段(Martz et al, 1992)。

由于DEM数据能够反映一定分辨率的局部地形特征, 因此可借助一定算法自动提取一定范围的自然水系(孙艳玲等, 2004), 为数字流域水文模型的建立及进一步的分析提供基础数据。基于DEM流域河网的自动提取方法很多, 主要可分为以下3类(李晶等, 2009): ①利用一个矩形窗口扫描DEM矩阵来确定洼地, 位于洼地内的栅格单元标记为水系

的组成部分(Tribe, 1992)。②坡面流模拟方法, 依据水总是沿斜坡最陡方向流动的原理, 确定DEM中每一个栅格单元的水流方向, 然后根据栅格单元的水流方向计算每一个栅格单元的上游给水区, 再选择合适的集流阈值(水道给养面积)来确定河网(O'Callaghan et al, 1984; Jenson et al, 1988; Martz et al, 1988)。③谷线搜索方法, 由DEM最低点按照河谷向上坡延伸, 逐步确定河网(Yoeli, 1984)。其中最常用的就是基于O'Callaghan等提出的坡面流模拟方法。

本文在介绍流域特征提取原理和方法的基础上, 从流域特征提取算法、软件的开发利用、不同尺度的影响及平缓区域的提取分析等方面, 评述了基于DEM的数字流域特征提取研究进展, 对今后DEM在流域特征提取及构建分布式水文模型的发展趋势进行展望。

2 基于DEM的水系提取与算法

2.1 DEM数据预处理算法

DEM预处理是为了将DEM数据中的洼地和平坦区改造成坡面, 从而使每个栅格单元都有一个

收稿日期: 2012-06; 修订日期: 2012-08.

基金项目: 国家重点研究基础发展计划“973计划”项目(2010CB951104); 国家自然科学基金项目(41271003, 50939006)。

作者简介: 宋晓猛(1987-), 男, 江苏徐州人, 博士生, 主要从事全球变化与流域水文模拟研究。E-mail: wenqingsxm@126.com

通讯作者: 占车生(1975-), 主要从事陆面过程模拟与水文水资源研究。E-mail: zhancs2006@gmail.com

明确的水流方向(万民等, 2008)。DEM数据预处理包括洼地填充和平坦地区网格单元处理, 在DEM自动提取水系过程中, 最复杂的就是对DEM数据中洼地的处理, 其处理结果的质量直接决定提取的水系与自然水系的接近程度(孙崇亮等, 2008), 国内外很多水文学者在此方面做了大量相关研究工作; 对平坦地区的DEM数据预处理也是水文学者的研究和关注热点之一。

O'Callaghan等提出的坡面流模拟方法, 多采用平滑DEM数据方法处理, 以减少洼地数目、提高处理效率, 但存在凹陷区域和平坦区域水流方向的不确定问题。Band(1986)提出了抬升洼地单元格应用于填平独立洼地的简单情形, 较最初的平滑DEM数据法更为准确。Jenson等(1988)和Martz等(1988)都运用垫高填平的方法对其进行改进, 两者区别在于是否把闭合洼地和平坦区域作为伪地形: 前者认为是伪地形, 应予以矫正; 而后者认为是真正的地表形态。这两种方法均可以处理所有洼地, 包括嵌套型洼地、平地内部洼地等多种复杂情况, 但平行河道的问题仍然存在。

在之后的应用中, 国内外很多学者采用这两种算法进行提取流域水系特征。Garbrecht等(1997a)又提出了不同的处理方法, 将洼地分为两类, 即为凹陷型和阻挡型, 对两种不同情况分别处理, 后经过Martz等(1999)改进, 提出了洼地裂开法, 通过降低洼地边缘处的坝型栅格单元高程, 模拟水流下切裂开洼地。对平坦区域的处理, Martz等(1992)采用高程增量叠加算法设定平坦格网内的水流方向, 避免了设置排水路径的任意性和不确定性, 后来两人又提出了新的方法, 将平坦区域DEM高程值改变以产生两个坡度, 其应用结果明显改进了平坦区域平行流问题(Garbrecht et al, 1997)。Lindsay等(2005)运用一种综合方法, 即比较上述的洼地填充法和裂开法各自的处理效率, 挑选相对快速有效的方法。

近10年来, 国内学者对此也开展相关研究工作, 如许捍卫等(2008)通过引入遥感信息弥补DEM缺陷方法, 提出了一种利用遥感影像提取流域水系信息, 采用基于数字河流和湖泊网络的水流方向修正法, 修正DEM中平坦地区主干河流及湖泊地区栅格的水流方向的流域数字水系提取方法, 以消除大量的平行河道, 修正与实际偏差较大的主干河流, 能够适应平坦地区与山区等不同地形的流域。

孔凡哲等(2003)认为DEM中闭合洼地和平坦区域是由于低质量的资料输入和内插误差等引起的, 提出了一种新算法, 通过增加输入地形高程信息, 避免DEM中平坦区域和闭合洼地的生成, 从而使由DEM生成的河网和实际河网精确吻合。朱庆等(2004)根据洼地间的出水口位置和指向关系, 提取洼地的矢量特征, 将矢量操作和栅格操作结合起来进行DEM中的洼地归并和填平处理。李勤超等(2007)则进一步将洼地平地抽象成矢量对象, 建立了洼地平地矢量结构模型, 操作这些矢量对象完成洼地归并和填平算法, 取得良好的效果。谢顺平等(2005, 2006)针对现有方法对复杂地形DEM中含有的平地、洼地及其嵌套情形的处理不足, 提出了栅格水流分类、洼地分类归并及有效填平处理、河谷平地的出流代价法构建栅格流向等新方法, 并在软件上得以实现, 且在黄土岭流域应用效果良好。李辉等(2009)针对现有洼地去除方法存在的问题, 提出了一种基于三方向搜索的洼地处理方法, 该方法通过对洼地及其周围栅格高程值增减来达到去除洼地的目的, 避免了传统算法大规模的对DEM进行增高处理, 实验结果表明算法简单易行, 有效的去除洼地, 消除伪河道及平行流问题, 且较大幅度的保留了原始地形信息。

另外, 在DEM中的凹地和平坦区去除方面还存在其他一些方法, 基本思想是直接确定包括凹地、平坦区域在内的相对大范围排水方向, 而不进行凹地填充, 如Chorowicz等(1992)提出的剖面扫描法和Nakayama(2000)的遗传算法都属于这种方法。此法在一定程度上可避免原始DEM数据的信息损失, 但缺乏物理基础(赖格英等, 2005), 且剖面扫描法自身无法完全产生相互联结的河网(Turcotte et al, 2001)。

国内学者还提出了针对不规则三角网的河流水系提取算法, 刘学军等(2008)和任政(2008)在分析TIN中三角形各边的汇流特性基础上, 依据矢量代数理论, 讨论了三角形各边和水流方向的关系, 并给出了各边汇流特性的判断准则, 基于此设计了TIN的河网水系提取算法, 取得良好的效果。叶爱中等(2005)针对DEM数据填洼处理存在不足, 避免了对DEM进行填洼处理, 从流域的出口直接向上游搜索, 通过图的遍历来确定流向, 使全流域形成一个有向无环图, 可以提取连续的河网, 且在黄河、泾河和白河流域的应用效果很好。

从上述研究可以看出对平地 and 洼地的处理方法直接影响到提取流域特征的效果,是自动提取河网和流域特征的关键所在(任立良等, 2000; 宋晓猛, 2012),目前的各种处理方法虽说都可以提取相对精确的河网,但仍未形成一个非常有效、且符合实际的处理方法,需要进一步的深入研究。

2.2 流向与路径确定算法

Tribe(1992)根据 O'Callaghan 等的算法提出产生坡面径流模拟算法的条件: DEM 中每个栅格单元都必须被赋予一个确定的水流方向。因此,水流方向是 DEM 为流域水文模型提供的最基本的一个信息。由于流域内各点汇水面积的计算、河网的提取等都是以前向为基础的,前向确定的正确与否直接影响到基于 DEM 的流域水文模型的模拟精度(孔凡哲, 2003)。前向判断的方法主要包括单前向法和多前向法两种,其中单前向法主要包括: D8 方法、Rho8 方法、Lea 方法、DEMON 方法、 D_{∞} 方法等(孙友波等, 2005)。

O'Callaghan 等提出的 D8 方法的主要思路是: 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,采用最陡坡度确定水流方向。但在应用时可能出现以下 3 种情况无法确定流向: ① 栅格有两个或多个可能方向; ② 平坦区域; ③ 闭合洼地处。为此 O'Callaghan 等以及 Skidmore(1990)提出了以顺时针从正北方向开始最先碰到的方向确定流向。Jenson 等(1988)利用类似的方法确定平坦区域中水流方向,提出如有 3 种相邻的可能时,可以选择中间的一个,并被认为是唯一能够满意地描述平地水流方向的方法(Martz et al., 1995)。

在此基础上, Fairesfield(1991)提出了 Rho8 方法用来解决多前向确定问题,虽然 Moore (1996)认为这个方法符合实际的流路,但 Costa-Cabral 等(1994)指出,其改进并没有从根本上解决 D8 方法的深层问题,因此提出了 DEMON 方法。该方法充分考虑了水流是二维的、均一的起源于某个网格表面,而不是水流中心;水流路径的宽度也是可变的,并非单网格宽,此法使用高程张量表示流向,从而计算水流路径的宽度。同时 Lea(1992)提出了一种针对 Rho8 算法的改进算法,称为 Lea 方法。其认为水流

是在最陡坡方向经过每个地形表面的滚动的球,而每个中心网格表面都是最适合该最陡方向的网格高程平面,水流方向用该平面坡向确定。Tarboton(1997)综合 Lea 方法和 DEMON 方法提出了 D_{∞} 方法,用三角面代替平面,坡度最陡的三角面的坡向即为该中心点的水流方向。

后来,在单前向基础上出现了多前向法(Multiple Flow Direction, MFD),如 FD8(Freeman, 1991)和 FRho8(Quinn et al, 1991)。除此之外,还包括 Holmgren(1994)和 Quinn 等(1995)提出的混合算法, Mitasova 等(1993)提出的矢量栅格算法等。刘光等(2003)对前向确定算法进行系统性总结,并对其应用情况作了简单叙述。秦承志等(2006a)提出了基于水流分配策略随下坡坡度变化的多前向算法(MFD-fg),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,从而使地形对水流分配的影响可以得到合理、有效的建模; MFD-fg 采用以最大下坡坡度的线性函数对水流分配进行加权,是较好的水流分配策略。与目前具代表性的单前向算法与多前向算法相比, MFD-fg 方法的结果可获得更合理的汇流面积。同时,对现有的多前向法进行分类,分为以下 4 种(秦承志等, 2006b): ① 固定水流分配权重的 MFD; ② 水流分配权重值随汇流面积变化的 MFD; ③ 水流分配权重值随局域地形特征变化的 MFD-fg; ④ 基于局域形态单元的 MFD。对上述 4 种多前向算法进行比较分析,得出第 3 种算法明显优于其他 3 种。郭伦等(2006)提出了基于 FD8 算法和 Rho8 算法的一种改进算法,其算法综合了 FD8 算法的多前向处理方法及 Rho8 算法对地形随机性的处理方法,并在黄土小流域和大南沟流域进行应用,验证结果显示其具有明显优越性。

3 基于DEM河网提取软件设计与应用

现在应用较多的数字流域水系提取的工具主要有 TOPAZ¹、RiverTools²和 ArcGIS³。TOPAZ(Topographic Parameterization)是自动进行数字地形分析的软件包,主要功能是通过输入栅格 DEM 定义

1 Garbrecht J, Martz L W. An Overview of TOPAZ: An automated digital landscape analysis tool for topographic evaluation, drainage identification, watershed segmentation, and sub-catchment parameterization. <http://homepage.usask.ca/~lwm885/topaz/overview.html>

2 Rivix LLC. Introduction to RiverTools. <http://rivix.com/>

3 ESRI. Introduction to Arc Hydro Tools. <http://resources.arcgis.com/en/home/>

地表水流域,划分子流域,确定河网结构和计算流域参数。TOPAZ对DEM的处理是基于D8方法、最陡坡度和最小给水面积阈值的概念相结合(Garbrecht et al, 1994),具体流程可见图 1a(刘华, 2007)。RiverTools是Research System Inc.研制的基于DEM的流域地表水文要素特征信息(如单元网格流模式、河网拓扑结构、流域及子流域边界等)提取、分析与可视化显示的专业分析系统,开发语言为交互式数据语言(IDL),处理流程如图 1b 所示(刘华, 2007)。ArcGIS Hydro Tools是ESRI 公司和美国得克萨斯州奥斯汀大学水资源研究中心开发的应用于水资源流域的数据模型,功能强大,包括DEM预处理、流向分析、汇流单元分析、河网结构提取、统计流域和河流的水力特征值等,具体计算流程如图 1c 所示(刘华, 2007)。

上述 3 个软件开发成功后,国内诸多学者利用 ArcGIS 工具(郭颖超等, 2008; 唐从国等, 2006; 张超等, 2005)、RiverTools 软件(张国义等, 2002)和 TOPAZ 程序(李婉辉等, 2005)进行 DEM 数据处理,进而提取流域水系,研制流域水文模型。同时也有部分学者对 ArcGIS 和 RiverTools 的应用结果进行了

比较,认为RiverTools虽然算法丰富,具有直观图形界面,但由于DEM的局限性、D8算法本身的缺陷等诸多因素影响,从原始DEM提取流域水文要素特征的实际应用受到很大限制;ArcGIS在当今研究过程中应用最多,其强大的功能及其二次开发能力使其颇受好评,但是水文模块作为其中一部分,在提取数字特征值时以子流域为单位统计,对整体区域参数整理比较繁琐(杜庆顺等, 2006; 刘华, 2007; 张行南等, 2004)。TOPAZ 也存在很大弊端,该模型实现复杂且需要做很多前期预备工作,在子流域生成和河网生成上仍存在很大的局限性(刘华, 2007)。

为此,针对目前国外提供的软件仍然不完善,国内开发了新型河网水系提取软件,如叶爱中等(2005)结合流向信息识别河网和谷线搜索提取河网两种基本思路,研制了一套自动提取河网划分子流域的方法 AEDNM。该方法在一定程度上解决了洼地和平地对提取河网的影响,通过在黄河、泾河和白河等流域的应用显示,对任何类型地形的 DEM 都能够提取连续河网,且无需对 DEM 进行填洼处理。刘华(2007)采用 Visual Basic 6 作为总体开发环境,用 Visual C++ 6 编写底层各个功能函数,采

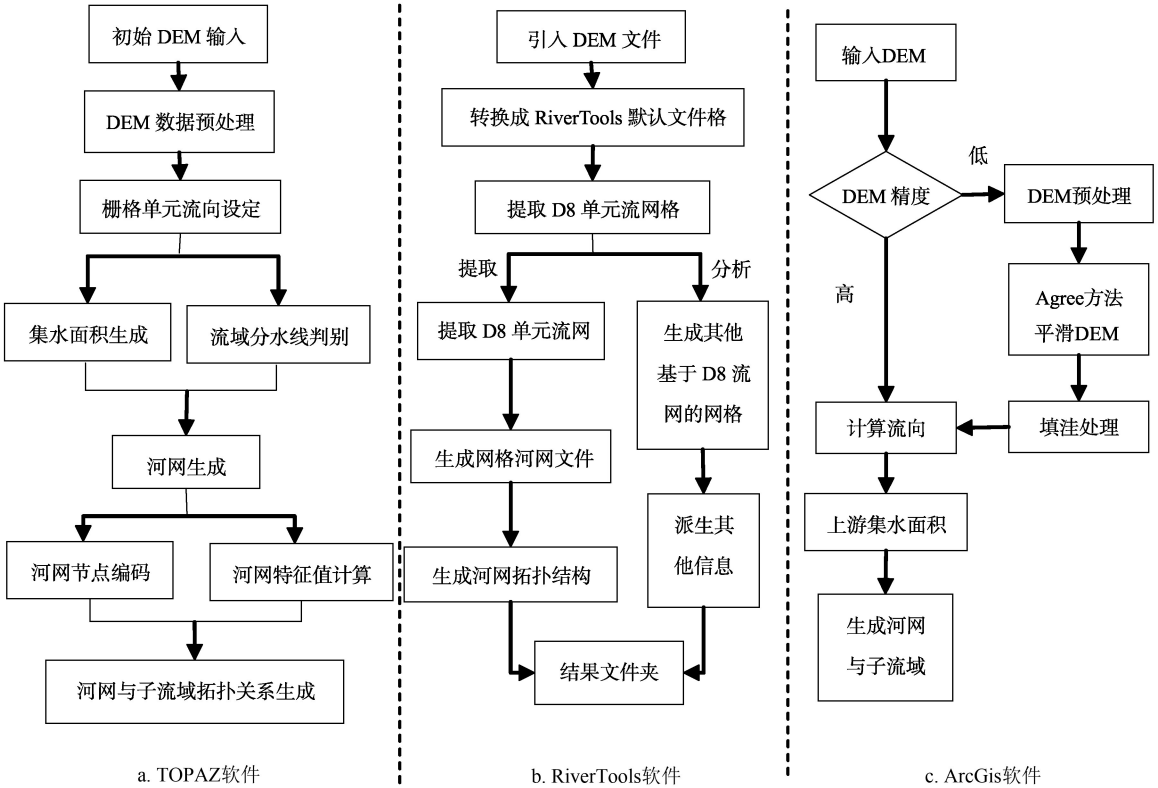


图 1 基于不同软件的DEM提取流域水系特征流程图

Fig.1 Flowchart of watershed feature extraction based on DEM with different software

用动态链接库以供VB调用,GIS模块采用ActiveX组件中的MapWinGIS进行软件开发,将其应用于淮河息县流域,结果与实际流域较吻合。于森(2007)采用Visual C++中的标准模板库,利用C++编程进行软件设计开发,并利用SRTM的DEM数据进行数字水系提取,对于填注算法采用基于标准模板库的W&L算法,并结合数据结构和树的概念确定流向算法,应用结果同样适用。虞玉诚(2005)采用系统开发原则,以最短流程法为基础,以区域增长法确定水流方向,计算出方向阵和累积阵,从而生成流域水系,在洼地处理上采用计算机自动处理和手动填注相结合的方式,通过系统开发进行提取流域河网及特征参数,该程序还可以用于参数修改,分析不同子流域情况,应用结果表明其功能满足当前的实际应用需要。郝振纯等(2005)利用电子地图中的河网图层作为DEM的附加信息,将其进行栅格化处理并叠加至DEM上,把复合河道位置信息的DEM自动连接成矢量河网,并以此作为依托处理其余区域,开发出了Channel Network Tool-I (CNT-I),不同分辨率的资料验证显示效果较好,说明其能够弥补现有软件工具使用单一数据源带来的问题与不足。

4 DEM尺度效应研究

不同尺度DEM由于其自身结构、提取方法、阈值大小等影响,提取的水系往往具有很大差别。从DEM中自动提取水系,常常是基于某一确定尺度的DEM,或一定范围流域(张宏才, 2004)。研究结果表明空间分布式水文模型对DEM水平分辨率很敏感,特别是在计算坡度和提取其他参数过程中,如Zhang等(1994)发现在稳定状态的河网条件下,运用空间分布水文模型TOPOG预测土壤水饱和程度,结果与DEM的格网尺度密切相关,同时确定了TOPMODEL模拟结果与DEM格网尺度的关系。Wang和Yin两位合作者分别对不同尺度和分辨率的DEM数据提取河网作了详细的比较分析,结果显示小尺度DEM提取河网特征优于大尺度结果,高分辨率效果好于低分辨率(Wang et al, 1998; Yin et al, 1999)。

在国内也有部分学者针对不同尺度和分辨率的DEM数据提取流域特征展开研究,Tang等(2001)针对复杂地形和不同分辨率的DEM数据进

行河网特征提取,实验表明DEM地形信息误差导致流域水系提取误差,则提取误差与DEM的垂直分辨率和地形粗糙度密切相关,同时高分辨率可以更好地提取河网信息。张宏才(2004)通过对不同空间尺度DEM数据提取水系比较分析,揭示了尺度因子对提取水系的影响,结果表明提取流域特征受比例尺和分辨率的影响显著,并建立了分辨率和比例尺与河网密度的相关关系。吴险峰等(2003)在黄河小浪底—花园口区区间流域分别用100~1000 m的6种不同水平分辨率的栅格DEM数据提取河网,研究表明随着网格的增大,平地流向确定的随意性增加,导致坡度值变化明显。郝振纯等(2004)采取不同取样方法获得多种尺度DEM数据,对不同分辨率下的流域特征值进行统计分析比较,结果表明随着分辨率变粗,流域地形坦化,提取的平均坡度及河网长度,河网密度逐渐减小,平均地形指数增大。王培法(2004)以黄土岭流域为例,对两种不同尺度,6种不同水平分辨率的栅格DEM进行流域特征参数提取的研究与分析,研究发现不同分辨率的DEM提取河网结构大体一致,但河网精度不同,提取的流域面积、河网密度、河道坡度、平均高程相差不大,河道长度和平均坡度相差较大;不同尺度DEM提取河网的流域参数差异明显,小尺度提取河网精度大于大尺度的结果,其中河道长度、坡度、平均高程和平均坡度相差较大。此外,杨传国等(2007)在研究构建大尺度分布式水文模型时通过ZB算法选择更合适的网格尺度DEM数据提取河网、坡度等数字流域特征,对今后的大尺度分布式水文模型的建立提供了参考。

5 平缓区域特征提取研究

DEM数据预处理是水文应用中的一个重要环节,其目的在于合理确定水流方向,得到精度较高的河网水系及数字流域特征,为分布式水文模拟提供基础数据。众多研究结果显示,基于DEM的水系提取,在地形起伏较大的山区等非平缓地区应用精度较高,但在平缓区域或人类活动影响较大的平原区则往往不尽如人意,尤其是人工渠系的影响难以排除。如何才能更有效地利用DEM对平缓地区的数字流域构建提供帮助,成为水文学界的一个重点研究方向,对此国内外也开展了大量工作。

对DEM原有的或者经过其他处理产生的平坦

区域,Martz等(1992)采用高程增量迭加算法设定平坦栅格内的水流方向,即通过平坦栅格单元数字高程的微调产生整个研究区内合理的汇流水系,此法避免了任意设置排水路径的弊端。之后 Martz 和 Garbrecht 对这一方法进行了多次改进(Garbrecht et al, 1997b; Martz et al, 1999)。周德民等(2008)利用 GIS 平台配合改进升值裂开算法进行三江平原洪河保护区的数字水系提取时,也指出当前的算法中仍存在河道偏移和河网形态失真等问题,需要进行多次修正。桑学锋等(2009)采用强可视化算法和高程增量迭加方法提取河网水系,以改进原有高程增量迭加算法提取过程的断开或不合理处,使其更符合平原区的水系提取,与实际情况更吻合。

通过对平坦区域的处理,虽可得到没有平行河道的数字河网,但往往与实际河网不吻合(孔凡哲等, 2011),究其原因在于多数研究仅针对局部区域的平坦栅格处理,而对于大范围的平坦区域研究,受到如湖泊、人工渠系等的影响,很难得到较高精度的数字水系。Turcotte 等(2001)提出的数字河流与湖泊网络 DRLN 方法提高湖泊与平原的处理能力,通过对 DEM 的栅格高程信息进行矫正,即所谓的“刻画河道”进行 DEM 数据处理,这样使提取的河网与实际河网相一致。

后来在此基础上,许捍卫等(2008)也采用该方法,借助于遥感影像提取秦淮河流域的河网水系;王加虎等(2005)引入矢量河网和栅格河网提取海河支流的滦河流域的河网水系,以此更有效地提取平原区的河网水系;郑子彦等(2009)利用河道数字化图层,通过高程强迫修正和流向强迫修正两种方案提取临沂市的河网水系,证实强迫作用使得提取流域水系更接近真实河道;肖飞等(2011)综合局部地形分析、水流模拟分析以及 GIS 空间和统计分析,进行人工微地貌分析,其提出的综合分析方法可以较好的提取出连续完整的平原区人工微地貌结构线;张维等(2012)利用 DEM 和地形图水系研究 3 种不同流向算法条件下的平缓地区水系提取研究,在秦淮河流域的实验结果显示添加数字化河道信息后的单流向算法(Agree & D8 算法)提取的水系更逼近实际河网。

6 结论与展望

基于 DEM 的数字流域水文特征提取是当前乃

至今后相当长时期的研究热点,其研究成果为构建分布式水文模型提供了基础条件,但仍存在着一些问题需要解决,如 DEM 水平分辨率和垂直分辨率的影响,以及 DEM 生成过程中的系统错误,都会产生诸多伪特征,需要对这些伪特征进行分辨处理,从而有效的提取与真实相近的河网。

因此,今后的研究中应重点开展以下研究:建立一套更加有效的预处理算法和集成方法来处理洼地和平地,更好的确定水流方向,进一步提高 DEM 数据的精度;分析不同尺度和分辨率 DEM 对提取流域特征信息的影响,特别是复杂地形的流域特征信息提取以及适用于大尺度分布式流域水文模型的 DEM 流域特征提取研究。这些都将为大尺度分布式水文模型及陆气耦合模型的发展乃至数字水文学的进步作出贡献。

参考文献(References)

- Band L E. 1986. Topographic partition of watersheds with digital elevation models. *Water Resources Research*, 22(1): 15-24.
- Chorowicz J, Ichoku C, Riazanoff S, et al. 1992. A combined algorithm for automated drainage network extraction. *Water Resources Research*, 28(5): 1293-1302.
- Costa-Cabral M C, Burges S J. 1994. Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. *Water Resources Research*, 30(6): 1681-1692.
- Du Q S, Kong F Z, Di S C, et al. 2006. Comparison analysis of extraction method on drainage networks based on DEM. *China Rural Water and Hydropower*, (8): 40-41. [杜庆顺, 孔凡哲, 邸苏闯, 等. 2006. 基于 DEM 的河网提取方法对比分析. *中国农村水利水电*, (8): 40-41.]
- Fairfield J, Leymarie P. 1991. Drainage networks from grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 27(5): 709-717.
- Freeman T G. 1991. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. *Computer & Geosciences*, 17(3): 413-422.
- Garbrecht J, Martz L W. 1994. Grid size dependency of parameters extracted from digital elevation model. *Computer & Geosciences*, 20(1): 85-87.
- Garbrecht J, Campell J. 1997a. An Automated Digital Landscape Analysis Tool for Topographic Evaluation, Drainage Identification, Watershed Segmentation and Sub-catchment Parameterization: TOPAZ User Manual. Okla-

- homa: USDA-ARS, Grazinglands Research Laboratory.
- Garbrecht J, Martz L W. 1997b. Automated channel ordering and node indexing for raster channel networks. *Computer & Geosciences*, 23 (9): 901-906.
- Guo Y C, Bi H X, Chen T, et al. 2008. Digital terrain analysis of Malian river basin based on DEM. *Science of Soil and Water Conservation*, 6(1): 101-106. [郭颖超, 毕华兴, 陈涛, 等. 2008. 基于DEM的马莲河流域数字地形分析. *中国水土保持科学*, 6(1): 101-106.]
- Hao Z C, Chi C X. 2004. The effect of spatial resolution and sampling method on the watershed features derived from DEM. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 26(5): 610-616. [郝振纯, 池宸星. 2004. 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*, 26(5): 610-616.]
- Hao Z C, Wang J H, Li L, et al. 2005. Principium and function of Channel Network Tool-I. *Journal of China Hydrology*, 25(2): 15-19. [郝振纯, 王加虎, 李丽, 等. 2005. Channel Network Tool-I的原理与功能. *水文*, 25(2): 15-19.]
- Holmgren P. 1994. Multiple flow direction algorithms for runoff modeling in grid-based elevation models: An empirical evaluation. *Hydrological Processes*, 8(4): 327-334.
- Jenson K, Dominique F O. 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographical information system analysis. *Photogrametric Engineering and Remote Sensing*, 54(11): 1593-1600.
- Kong F Z. 2003. Distributed watershed hydrological model and flow concentration based on digital technique [D]. Nanjing: Hohai University. [孔凡哲. 2003. 基于数字化平台的分布式水文模型和流域汇流研究[D]. 南京: 河海大学.]
- Kong F Z, Rui X F. 2003. New method for treating flat areas and closed depressions in the digital elevation models. *Advances in Water Science*, 14(3): 90-94. [孔凡哲, 芮孝芳. 2003. 处理DEM中闭合洼地和平坦区域的一种新方法. *水科学进展*, 14(3): 90-94.]
- Kong F Z, Song X M. 2011. A method for reducing the effect of transforming the type of DEM on derived drainage network. *Journal of China University of Mining & Technology*, 40(3): 399-404 [孔凡哲, 宋晓猛. 2011. 一种减低DEM数据类型转换对河网提取影响的方法. *中国矿业大学学报*, 40(3): 399-404.]
- Lai G Y, Yu G, Gui F. 2005. Comparison and application of several DEM hydrologic preprocessing algorithms for automated drainage network extraction. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 33(4): 386-390. [赖格英, 于革, 桂峰. 2005. 河网自动提取技术中DEM的几种预处理算法及应用. *河海大学学报: 自然科学版*, 33(4): 386-390.]
- Lea N L. 1992. An aspect driven kinematic routing algorithm in overland flow: Hydraulics and erosion mechanics. New York: Chapman & Hall.
- Li H, Chen X L, Zhang L H, et al. 2009. Depression removal method for grid DEM based on three-direction search. *Advances in Water Science*, 20(4): 473-479. [李辉, 陈晓玲, 张利华, 等. 2009. 基于三方向搜索的DEM中洼地处理方法. *水科学进展*, 20(4): 473-479.]
- Li J, Zhang Z, Zhu J G, et al. 2009. Hydrological feature extraction of Taihu lake basin based on DEM. *Environmental Science and Management*, 34(5): 138-142. [李晶, 张征, 朱建刚, 等. 2009. 基于DEM的太湖流域水文特征提取. *环境科学与管理*, 34(5): 138-142.]
- Li L, Hao Z C. 2003. The automated extraction of catchment properties from digital elevation models. *Advances in Earth Science*, 18(2): 251-256. [李丽, 郝振纯. 2003. 基于DEM的流域特征提取综述. *地球科学进展*, 18(2): 251-256.]
- Li Q C, Li H W, Meng C Y. 2007. An algorithm for extracting watershed features based on DEM. *Science of Surveying and Mapping*, 32(1): 103-104. [李勤超, 李宏伟, 孟婵媛. 2007. 基于DEM提取水域特征的一种算法实现. *测绘科学*, 32(1): 103-104.]
- Li W H, Pan W B. 2005. The establishment of drainage network based on digital elevation data: The application to Aojiang watershed. *Journal of Xiamen University: Natural Science*, 44(z1): 80-83. [李婉辉, 潘文斌. 2005. 基于高程数据的流域水系构建: 以敖江流域为例. *厦门大学学报: 自然科学版*, 44(增刊): 80-83.]
- Lindsay J B, Creed I F. 2005. Removal of artifact depressions from digital elevation models: towards a minimum impact approach. *Hydrological Processes*, 19(16): 3113-3126.
- Liu G, Li S D, Zhang L. 2003. A review of the channel network extraction from digital elevation model. *Geography and Geo-Information Science*, 19(5): 11-15. [刘光, 李树德, 张亮. 2003. 基于DEM的沟谷系统提取算法综述. *地理与地理信息科学*, 19(5): 11-15.]
- Liu H. 2007. Research and Application of the software for extracting the digital watershed characteristics [D]. Nanjing: Hohai University. [刘华. 2007. 数字流域信息提取软件研究及应用[D]. 南京: 河海大学.]
- Liu X J, Wang Y J, Ren Z, et al. 2008. Algorithm for extracting drainage network based on triangulated irregular network. *Journal of Hydraulic Engineering*, 39(1): 27-34. [刘学军, 王永君, 任政, 等. 2008. 基于不规则三角网的河网提取算法. *水利学报*, 39(1): 27-34.]
- Martz L W, de Jong E. 1988. Catch: A Fortran program for measuring catchment area from digital elevation models. *Computer & Geosciences*, 14(5): 627-640.
- Martz L W, Garbrecht J. 1992. Numerical definition of drain-

- age network and subcatchment areas from digital elevation models. *Computers Geosciences*, 18(6): 747-761.
- Martz L W, Garbrecht J. 1995. Automated recognition of valley lines and drainage network from digital elevation models: A review and a new method-Comment. *Journal of Hydrology*, 167(1-4): 393-396.
- Martz L W, Garbrecht J. 1999. An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM. *Computer & Geosciences*, 25(7): 835-844.
- Mitasova H, Hofierka J. 1993. Interpolation by regularized spline with tension: II. Application to terrain modeling and surface geometry analysis. *Mathematical Geology*, 25(6): 657-669
- Moore I D. 1996. Hydrological modeling and GIS//Goodchild L T, Steyaert B O, Parks C, et al. *GIS and Environmental Modeling, Progress and Research Issues*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Nakayama D. 2000. A study of DDM accuracy comparison between two routing algorithm: GA flow algorithm and flooding type algorithm. *Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University*, 35: 83-98.
- O'Callaghan F, Mark D M. 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28(3): 323-344.
- Qin C Z, Li B L, Zhu A X, et al. 2006a. Multiple flow direction algorithm with flow partition scheme based on downslope gradient. *Advances in Water Science*, 17(4): 450-456. [秦承志, 李宝林, 朱阿兴, 等. 2006a. 水流分配策略随下坡坡度变化的多流向算法. *水科学进展*, 17(4): 450-456.]
- Qin C Z, Li B L, Zhu A X, et al. 2006b. Review of multiple flow direction algorithms based on gridded digital models. *Earth Science Frontiers*, 13(3): 91-98. [秦承志, 李宝林, 朱阿兴, 等. 2006b. 基于栅格DEM的多流向算法述评. *地学前缘*, 13(3): 91-98.]
- Quinn P F, Beven K J, Chavallier P. 1991. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models. *Hydrological Processes*, 5(1): 59-79.
- Quinn P F, Beven K J, Lamb R. 1995. The $\ln(\alpha/\tan\beta)$ index: how to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework. *Hydrological Processes*, 9(2): 161-182.
- Ren L L, Liu X R. 2000. A review of the digital elevation model extraction and digital hydrological modeling. *Advances in Water Science*, 11(4): 463-469. [任立良, 刘新仁. 2000. 数字高程模型信息提取与数字水文模型研究进展. *水科学进展*, 11(4): 463-469.]
- Ren Z. 2008. The study about the algorithms of automatic drainage extracting and software design based on triangulated irregular network[D]. Nanjing: Nanjing Normal University. [任政. 2008. 基于不规则三角网的流域特征自动提取算法与原型系统设计研究[D]. 南京: 南京师范大学.]
- Sang X F, Zhai Z L, Wang H, et al. 2009. Extraction of digital river system in Plain areas affected by human activities. *Journal of China Hydrology*, 29(6): 69-72. [桑学锋, 翟正丽, 王浩, 等. 2009. 强人类活动干扰下的平原区数字水系构建. *水文*, 29(6): 69-72.]
- Skidmore A K. 1990. Terrain position as mapped from a gridded digital elevation model. *International Journal of Geographical Information Systems*, 4(1): 33-49.
- Song X M. 2012. Uncertainty quantification for distributed time-variant gain hydrological model based on response surface methodology [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology. [宋晓猛. 2012. 基于响应曲面方法的分布式时变增益水文模型不确定性量化研究[D]. 徐州: 中国矿业大学.]
- Song X M, Kong F Z. 2010. Application of Xinanjiang model coupling with artificial neural networks. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 30(6): 135-138 [宋晓猛, 孔凡哲. 2010. 新安江模型和人工神经网络的耦合应用. *水土保持通报*, 30(6): 135-138.]
- Song X M, Zhan C S, Kong F Z, et al. 2011. A review on uncertainty analysis of large-scale hydrological cycle modeling system. *Acta Geographica Sinica*, 66(3): 396-406. [宋晓猛, 占车生, 孔凡哲, 等. 2011. 大尺度水循环模拟系统不确定性研究进展. *地理学报*, 66(3): 396-406]
- Sun C L, Wang J L. 2008. The progress on automatic basin streamline extracting and classifying methods based on DEM. *Progress in Geography*, 27(1): 118-124. [孙崇亮, 王卷乐. 2008. 基于DEM的水系自动提取和分级研究进展. *地理科学进展*, 27(1): 118-124.]
- Sun Y B, Gong H L, Zhao W J, et al. 2005. The simple discussion of the method for extracting digital channel network from digital elevation model of watershed. *Journal of Capital Normal University: Natural Sciences*, 26(2): 106-111. [孙友波, 宫辉力, 赵文吉, 等. 2005. 基于DEM的数字河网生成方法的浅议. *首都师范大学学报: 自然科学版*, 26(2): 106-111.]
- Sun Y L, Liu H B, Xie D T, et al. 2004. Study of extracting drainage network of watershed from digital elevation model. *Resources Survey & Environment*, 25(1): 18-22. [孙艳玲, 刘洪斌, 谢德体, 等. 2004. 基于DEM流域网水系的提取研究. *资源调查与环境*, 25(1): 18-22.]
- Tang C G, Liu C Q. 2006. Automated extraction of watershed characteristics based on ArcHydro Tools: A case study of Wujiang watershed in Guizhou province, southwest China. *Earth and Environment*, 34(3): 30-37. [唐从国, 刘从强. 2006. 基于ArcHydro Tools的流域特征自动提取: 以

- 贵州省内乌江流域为例. 地球与环境, 34(3): 30-37.]
- Tang G A, Hui Y H, Josef S. 2001. The impact of resolution on the accuracy of hydrologic data derived from DEMs. *Journal of Geographical Sciences*, 11(4): 393-401.
- Tarboton D G. 1997. A new method for the determination of flow direction and unslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33(2): 309-319.
- Tribe A S. 1992. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method. *Journal of Hydrology*, 139 (1-4): 263-293
- Turcotte R, Fortin J, Rousseau A N, et al. 2001. Determination of drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. *Journal of Hydrology*, 240(3-4): 225-242
- Wan M, Xiong L H, Wei X J. 2008. Review of the preprocessing methods of digital elevation models. *Journal of China Hydrology*, 28(5): 11-17. [万民, 熊立华, 卫晓婧. 2008. 数字高程模型预处理方法的研究进展. 水文, 28(5): 11-17.]
- Wang J H, Hao Z C, Li L. 2005. Extraction of drainage structure from digital elevation model by combination with raster river network. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 33(2): 119-122. [王加虎, 郝振纯, 李丽. 2005. 基于DEM和主干河网信息提取数字水系研究. 河海大学学报: 自然科学版, 33(2): 119-122.]
- Wang P F. 2004. Analysis of scale and horizontal resolution of raster DEM on extracted drainage basin in characteristics. *Journal of Jiangxi Normal University: Natural Sciences Edition*, 28(6): 549-554. [王培法. 2004. 栅格DEM的尺度与水平分辨率对流域特征提取的分析: 以黄土岭流域为例. 江西师范大学学报: 自然科学版, 28(6): 549-554.]
- Wang X H, Yin Z Y. 1998. A comparison of drainage networks derived from digital elevation models at two scales. *Journal of Hydrology*, 210(1-4): 221-241.
- Wu L, Wang D M, Zhang Y. 2006. Research on the algorithms of the flow direction determination in ditches extraction based on grid DEM. *Journal of Image and Graphics*, 11 (7): 998-1003. [邬伦, 汪大明, 张毅. 2006. 基于DEM的水流方向算法研究. 中国图像图形学报, 11(7): 998-1003.]
- Wu X F, Liu C M, Wang Z G. 2003. Effect of horizontal resolution of raster DEM on drainage basin characteristics. *Journal of Natural Resources*, 18(2): 148-154. [吴险峰, 刘昌明, 王中根. 2003. 栅格DEM的分辨率对流域特征的影响分析. 自然资源学报, 18(2): 148-154.]
- Xiao F, Du G, Parrot J F, et al. 2011. Digital extraction of artificial micro-geomorphology in Plain areas based on DEM. *Scientia Geographica Sinica*, 31(6): 647-653. [肖飞, 杜耘, Parrot J F, 等. 2011. 基于DEM的平原区人工微地貌数字提取方法探讨. 地理科学, 31(6): 647-653.]
- Xie S P, Du J K, Luo W J, et al. 2006. The extraction of properties in catchment with complex terrain based on DEM. *Geographical Research*, 25(1): 96-103. [谢顺平, 都金康, 罗维佳, 等. 2006. 基于DEM的复杂地形流域特征提取. 地理研究, 25(1): 96-103.]
- Xie S P, Du J K, Wang L C. 2005. Methods for processing depression and flat areas in extracting drainage networks based on the DEM. *Advances in Water Science*, 16(4): 535-540. [谢顺平, 都金康, 王腊春. 2005. 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, 16 (4): 535-540.]
- Xu H W, He J, She Y J. 2008. Method for extraction of digital drainage network in the Qinhuai river basin based on DEM and remote sensing. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 36(4): 443-447. [许捍卫, 何江, 余远见. 2008. 基于DEM与遥感信息的秦淮河流域数字水系提取方法. 河海大学学报: 自然科学版, 36(4): 443-447.]
- Yang C G, Yu Z B, Lin Z H, et al. 2007. Method study of constructing digital watershed for large-scale distributed hydrological model. *Progress in Geography*, 26(1): 68-76. [杨传国, 余钟波, 林朝晖, 等. 2007. 大尺度分布式水文模型数字流域提取方法研究. 地理科学进展, 26(1): 68-76.]
- Ye A Z, Xia J, Wang G S, et al. 2005. Drainage network extraction and subcatchment delineation based on digital elevation model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 36(5): 531-537. [叶爱中, 夏军, 王纲胜, 等. 2005. 基于数字高程模型的河网提取及子流域生成. 水利学报, 36(5): 531-537.]
- Yin Z Y, Wang X H. 1999. A cross-scale comparison of drainage basin characteristics derived from digital elevation models. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(6): 557-562.
- Yoeli P. 1984. Computer-assisted determination of the valley and ridge lines of digital terrain models. *International Yearbook Cartographica*, 24: 197-205.
- Yu M. 2007. Extraction of digital drainage network characteristics based on standard template library[D]. Nanjing: Hohai University. [于森. 2007. 基于标准模板库的数字水系特征提取研究[D]. 南京: 河海大学.]
- Yu Y C. 2005. Study on the digital drainage area water system building [D]. Nanjing: Hohai University. [虞玉诚. 2005. 数字流域水系生成系统研究[D]. 南京: 河海大学.]
- Zhang C, Zheng J, Zhang S L, et al. 2005. Extraction of hydrological information from digital elevation model with ArcGIS9.0. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 36(11): 1-4. [张超, 郑钧, 张尚弘, 等. 2005. ArcGIS9.0中基于DEM的水文信息提取方法. 水利水电技

- 术, 36(11): 1-4.]
- Zhang G Y, Fang M H, Xu Y, et al. 2002. A brief view of RSI River Tools and its application. *Computer Applications*, 22(8): 38-40. [张国义, 房明惠, 徐云, 等. 2002. RSI River Tools 系统及其应用介绍. *计算机应用*, 22(8): 38-40.]
- Zhang H C. 2004. Scale effect on extracting drainage network based on different scale DEM [D]. Xi'an: Northwestern University. [张宏才. 2004. 不同尺度数字高程模型提取水系的尺度效应[D]. 西安: 西北大学.]
- Zhang W, Yang X, Tang G A, et al. 2012. DEM-based flow direction algorithms study of stream extraction and watershed delineation in the low relief areas. *Science of Surveying and Mapping*, 37(2): 94-96. [张维, 杨昕, 汤国安, 等. 2012. 基于 DEM 的平缓地区水系提取和流域分割的流向算法分析. *测绘科学*, 37(2): 94-96.]
- Zhang X N, Ye L H, Jing L Y. 2004. Comparative analysis of drainage networks derived from grid-based DEM. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 24(3): 1-4. [张行南, 叶丽华, 井立阳. 2004. 基于 DEM 的流域水网对比分析. *水利水电科技进展*, 24(3): 1-4]
- Zhang W, Montgomery D R. 1994. Digital elevation model grid size, landscape representation and hydrologic simulations. *Water Resources Research*, 30(4): 1019-1028.
- Zheng Z Y, Zhang W C, Tai Q G. 2009. A comparative study on different schemes of automatic river system extraction based on DEM and vector channels. *Resources Science*, 31(10): 1730-1739. [郑子彦, 张万昌, 邵庆国. 2009. 基于 DEM 与数字化河道提取流域河网的不同方案比较研究. *资源科学*, 31(10): 1730-1739.]
- Zhou D M, Chen J Q, Xiong L H. 2008. Digital extraction of surface hydrological elements from DEM data in the wetland area of flood plain. *Scientia Geographica Sinica*, 28(6): 776-781. [周德民, 程进强, 熊立华. 2008. 基于 DEM 的洪泛平原湿地数字水系提取研究. *地理科学*, 2008, 28(6): 776-781.]
- Zhu Q, Zhao J, Zhong Z, et al. 2004. The extraction of topographic patterns based on regular grid DEMs. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 33(1): 77-82. [朱庆, 赵杰, 钟正, 等. 2004. 基于规则格网 DEM 的地形特征提取算法. *测绘学报*, 33(1): 77-82.]

Advances in digital watershed features extracting based on DEM

SONG Xiaomeng^{1,2}, ZHANG Jianyun^{1,2}, ZHAN Chesheng³, LIU Jiufu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Research Center for Climate Change, The Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Digital elevation models(DEMs) can be considered as a digital representation of landscape topographic properties. Construction of a DEM-based digital model for a drainage network and extraction of hydrological attributes of the drainage network are important premises for simulation of distributed hydrological processes in a catchment. Usually, the quality and efficiency of the extraction of hydrological characteristics of a river basin from DEM data are affected by treatment of the closed depressions and flat areas in DEM, determination of flow directions, and selection DEM resolutions. In this paper, fundamental principles, methods and algorithms for extraction of the features of drainage networks and watersheds are reviewed; research progresses on the methods for treatment of flat areas and depressions and for determination of flow directions are discussed; the progress on software design and development for extractions from different types of DEM data are introduced; the effects of different scales and resolutions of DEM on the extraction of drainage network and watershed features are explored. Furthermore, the research progresses on the extraction of the features of drainage networks in flat areas and plain region are summarized.

Key words: digital elevation model; digital river basin; channel network extraction; review