

基于格网 DEM 的流域水文信息提取

——以陕西省绥德县韭园沟流域为例

江炯¹, 宗佳亚², 魏舟²

(1. 陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安 710075; 2. 陕西区域地质矿产研究院, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 利用流域范围内的格网 DEM 提取流域水文信息, 并与当地枯水期 TM 影像进行对比, 得出相应结论。研究采用国家标准比例尺 1:50000 的数字地形图作为数据源, 利用等高线和高程点信息, 在 ArcGIS 软件中生成研究区 5 m 分辨率的数字高程模型 DEM, 并在 DEM 的基础上, 利用 ArcGIS 中的水文分析模块对研究区流域内的水文特征、水流方向、河网信息等进行提取, 并将不同阈值条件下提取河网结果与 TM 影像进行对比得出以下结论: 阈值设定为 400000 时吻合度最高, 当阈值高于此值时, 河网支流信息遗失较多, 且部分主干道也存在断流现象; 当阈值低于此值时, 会出现很多在现实中不存在的“伪河道”; 利用 DEM 进行河网提取时会出现平行河网和主干道缺失的现象; 在基于 DEM 提取河网的算法中, 可以考虑在栅格上赋较高的水量值, 代替上来水, 但是这势必影响模型的自动化程度, 同时赋值的大小也有待于研究。

关键词: DEM; 河网提取; TM; 阈值; 格网; TIN; 流域水文信息提取

中图分类号: P208; P333

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)05-0117-07

Extraction of watershed hydrological information based on grid DEM: Taking Jiuyuangou watershed in Suide county of Shaanxi province as an example

JIANG Jiong¹, ZONG Jiaya², WEI Zhou²

(1. Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an 710075, China;

2. Shaanxi Institute of Regional Geology and Mineral Resources, Xianyang 712000, China)

Abstract: The hydrological information of the basin was extracted by using the grid DEM in the watershed, and compared with the local dry season TM image to draw conclusion. By using the national standard scale 1:50000 digital topographic map as the data source and contour and altimetric point information in the research, 5 m resolution DEM in the study area was generated in ArcGIS software, and on the basis of DEM, hydrological characteristics, flow direction and network information were extracted by using ArcGIS in hydrological analysis. After comparing the network extraction results in different threshold with TM images the conclusion is drawn that: the degree of anastomosis is the highest when threshold is set to 400000, when the threshold value is higher than 400000, it will lead to more river branches information loss, and part of the main stream has dried up. When the threshold is lower than 400000, there will be a lot of "pseudo river" which does not exist in the reality. The parallel river network and main stream will be missing when using the DEM drainage network extraction. In the algorithm based on DEM extraction river network, it is possible to replace the upstream water with higher water value on the grid, but this will inevitably affect the degree of automation of the model, and the size of the assignment needs to be studied.

Key words: DEM; drainage network extraction; TM; Threshold; TIN; extraction of watershed hydrological information

水系河网是地表流水地貌的主要组成部分, 是流域内各种自然地理要素综合作用相互影响的结

果。不同地区自然环境条件差异较大, 坡度、地表植被、地形等条件不同, 河网形态在外观上也是迥然不

收稿日期: 2017-05-03; 修回日期: 2017-05-23

作者简介: 江炯 (1978-), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事土地工程相关领域研究。

通讯作者: 宗佳亚 (1982-), 男, 陕西西安人, 大学本科, 工程师, 主要从事土地工程相关领域。

同。同时,流域对自然地理环境也有很大的反作用^[1-3],它作为一个开放系统与周围环境不断进行着物质和能量的交换,反作用于植被,土壤等自然地理要素^[4-5]。

过去,河网的提取通常采用数字化地形图或其他图件中的水流线的方法,这种方法不仅工作量巨大,耗时耗力,且存在水系等级只能人为确定一些低等级河流无法被数字化等问题,严重影响河网提取的准确度。自 20 世纪末起,随着空间观测技术、遥感技术的迅猛发展及计算机图形学的发展,针对水文观测的方法也发生了颠覆式的变化,水文学、计算机、信息技术的相互融合诞生了数字水文学^[6]。随着数字水文学发展,通过数字技术能够实现流域地形、河网、分水线、子流域的提取和积水面的计算,因此诞生了很多特定的水温模型使得水文模拟的效率得到了质的提高。利用 DEM 建立流域水文模型成为目前大多数学者研究的一个重点区域^[7-11]。目前,国内外利用 DEM 提取水系的基本方法有两种:(1) Qian(1990) 和 Band(1986) 提出利用矩形窗口扫描数字高程模型矩阵从而确定洼地,识别出洼地栅格将其标记为水系组成;(2) O'Callaghan 与 Marks^[12-15] 以坡面径流拟合作为理论基础,先计算出研究对象栅格的汇水面积,结合汇水面面积的阈值设定判定河网。因此方法利用了水文学中的汇流理论判断水流路径,能够生成连续流路,所以被认为是河网提取当中较好的一种方法,研究过程中采用此方法结合不同阈值对韭园沟流域水文信息进行提取并得出相应的结论。

1 研究区域概况

韭园沟流域属典型黄土高原黄土丘陵沟壑,地处无定河中游。流域内土壤质地疏松、均匀,主要以黄绵土为主,土壤孔隙较大。流域内地形起伏变化复杂,梁峁起伏,沟壑纵横,地形破碎,沟道平均比降为 1.2%,沟壑密度为 5.34 km/km²。研究对象流域中游较宽,而上下游相对较窄,外形接近菱形,其水系形状为典型的树枝状,这种特征说明此流域是在岩性土质平面分布均匀的缓倾斜地面发育的水系。

2 数据来源与数据预处理

数据来源:试验数据采用绥德县韭园沟 1:50000 数字地形图,1980 西安坐标系和 1985 年高程基准;流域范围枯水期 TM 影像。由于流域面积较大,共涉及 4 个图幅,图幅编号为:j49e015009,

j49e015010, j49e016009, j49e01610。数据预处理包括图幅拼接、坐标转换、格网 DEM 生成三个步骤。

2.1 图幅拼接与坐标转换

2.1.1 图幅拼接 由于研究区域涉及 4 个图幅,为了便于以后研究,需要把 4 个区域的数据进行拼接合并。在 ArcMap 中合并时要保证合并图层的要素一致,因本试验主要涉及河网提取,仅需完成对等高线和高程点图层的合并即可。图 1 为研究区域合并后的数字地形图,图 2 为研究区域合并后局部放大图。

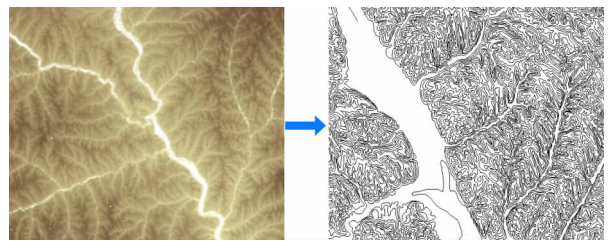


图 1 合并后的等高线 图 2 局部区域的放大

2.1.2 坐标转换 由于在 ArcGIS 中用于表面建模的 TIN 应使用投影坐标系构造,不能使用地理坐标系。xy 单位是角度时,坡度、体积和通视分析等功能会产生错误。而原始数据正是地理坐标系,若直接用来生成 DEM 会出现沿 TIN 构造线的结构线,使整个 DEM 呈现线结构,所以在生成 TIN 数据以前,必须将地理坐标系转换成投影坐标系。ArcToolbox 提供了坐标转换的工具,首先需要先利用 Define Projection 工具为数据定义一个坐标系统,再利用 Project 工具对数据进行投影变换。

在试验中,在 ArcMap 中加载了图层之后,打开 View - Data Frame. Properties 对话框,显示当前的投影坐标系统为 GCS_User_Defined,在下面的选择坐标系统框中选择 Xian_1980_GK_Zone_19,在右边有一个按钮为“转换”,点击后会改变数据框的空间参考信息。然后把要转换的数据导出,选择与数据框使用相同的坐标系,就可以完成数据投影的转换。

2.2 格网 DEM 的生成

不规则三角网实际上属于一种网络结构,侧重于空间上数据点的相互关系,地形信息如高度、坡向等是间接表达,而是将以上信息隐含到其模型中。因此进行较难的空间分析时,不规则三角网模型并不是很合适。ArcGIS 中的 GRID 是一种重要的栅格数据模型,它是通过地图代数语言实现复杂空间的分析功能,由于采用了流程编码的结构,具有处理速度存储量低的特点。

在进行数字地形模型表示的方法中精度最高的是由等高线转化为不规则三角网,再由不规则转规则的形式。因此试验数据分析采用此类方式,先从等高线、高程点等矢量数据生成 TIN 模型,再提取 GRID 丰富的空间信息,通过水文分析模块进行模型分析。

2.2.1 TIN 的生成 打开 ArcMap 的 3D 分析模块,选择 3D Analyst 工具 -> TIN 管理 -> 创建 TIN。选择 contour_line,设置高度源为 ELEV;三角网作为“硬短线”;并设置 TIN 的输出路径。生成的 TIN 结果如图 3。

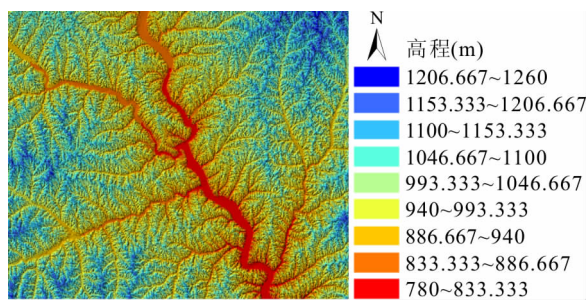


图3 研究区 TIN 图

2.2.2 格网 DEM 生成 将生成的 TIN 转化为 GRID;选择 3D Analyst 工具 -> 转换 -> 由 TIN 转出 -> TIN 转栅格。根据 DEM 质量控制要求,设置格网大小为 5 m,并设置输出保存路径,生成的格网如图 4。

由于数据误差、内插方法等不确定因素的影响,常存在低陷洼地、平地 and 陡变的高峰,这些都会使水流线的跟踪变得困难,从而使水系提取过程复杂化,河网出现间断或不连通的状况。所以在判断水流方向时,必须先对洼地进行填平,平地进行抬升,减少对结果的影响。平地是指栅格单元高程没有差异的区域,它的出现会造成水流方向的平行,生成不合理的排水系统。凹地(洼地)是指那些高程比环绕它四周的栅格单元的高程低的栅格单元。DEM 中的凹地可以是自然景观中地形特征的一种正确反应,一般受冰川作用影响的地区和喀斯特景观地区都存在自然的洼地。现实状况中,水由高处向低处流,遇到洼地就将其填满,再从洼地最低出口处流出。洼地本身是一个局部栅格区域的最低点,水流填满洼地后就无法确定水流方向。但是在 DEM 中,大部分凹地是由数据采样和数据处理中的错误造成的,属于“伪洼地”。这些“伪洼地”带来了水流方向上计算的问题,导致了 3 种错误的排水方向——相反流向、相交水流和循环水流(如图 5,6,7),影响相互连接的排水网络的获取。

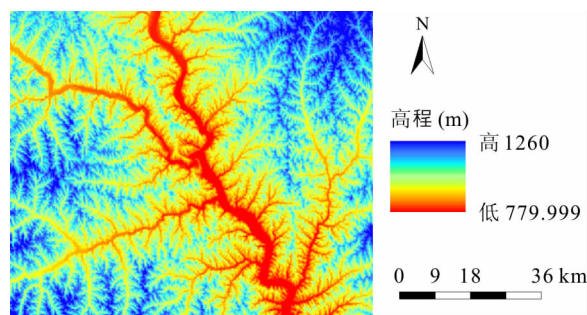


图4 研究区格网 DEM 效果图

3 基于格网 DEM 的流域水文信息提取

3.1 DEM 的预处理

3.1.1 DEM 预处理的内容 DEM 在生成过程中

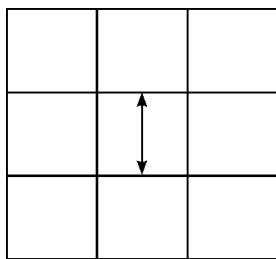


图5 相反流向

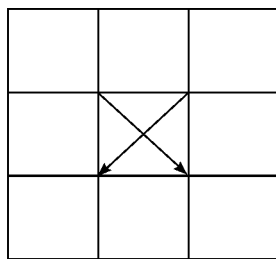


图6 交叉水流

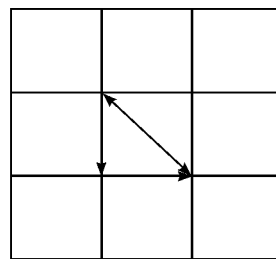


图7 循环水流

3.1.2 DEM 中凹地和平坦区的去除方法

(1)洼地标定与填平。DEM 数据中,洼地是被高程值较高的栅格所包围的地形单元格,它影响着地表流水过程。洼地栅格指相邻 8 个栅格高于本栅格的栅格。当遇到洼地栅格时,利用开窗算法把洼地进行填平,跟周围高程最低的栅格进行比较,并最

终保持一致。

(2)削峰。与洼地类似,突起高峰是指一个单元格的高程与它的相邻的 8 个单元格的高程有明显的增加,处理的方法与填洼类似。

3.1.3 在 Arc map 中实现 点击 Arc Toolbox 中的 Analyst 工具 -> Spatial Analyst 工具 -> 水文分析

->填洼。在填洼的选项中有一个“z 限制”,表示要填充的凹地与倾泻点之间的最大高程差。如果凹地与其倾泻点之间的 z 值之差大于 z 限制,则不会填充此凹地。默认的情况下会填充所有的凹地(不考虑深度)。

所研究区域未填挖之前的 DEM 如图 8,由图中信息可以清楚的看出地形的高低起伏,韭园沟流域属于典型的黄土高原地形,没有自然的地形凹地,因此 z 为默认值,即把所有的凹地都填平,填洼后的结果如图 9。

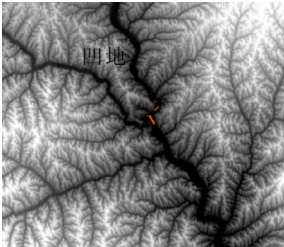


图 8 填洼前的凹地

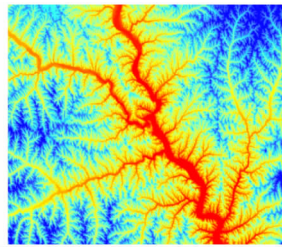


图 9 填洼后的 DEM 图

3.2 DEM 的水流方向算法

河网自动提取核心技术是路径算法,其主要描述地表物质(如水流,泥沙等)在地表由高处到低处的传送和流动。通过路径算法,不仅可以提取河谷

也可以获取水文、土壤侵蚀等网络,方便下一步进行子流域的划分。同时也可以获取汇水面积,水流长度等水文,土壤侵蚀模型等建立所需要的地形参数,还可以确定地形单元物质的流出量和流入量分布情况。

路径算法赖以进行的数据基础是 DEM。在 ArcGIS 中,数字高程模型常用规则格网形式表达,而且目前在格网 DEM 上路径算法较多,适用性较强。主要算法有单流向算法、双流水方向的算法、三流水方向的算法和多流向算法。

研究采用 ArcGIS 中的水文分析模块(Hydrology),该模块采用的是基于单流向的 D8 算法,因此研究中的水流方向计算式基于 D8 算法。

3.2.1 D8 算法原理介绍 基于 DEM 定义水流方向的最简单且使用最广泛方法是由 O'Callaghan 等提出 D8 算法。ESRI 研发的 GIS 软件主要采用了这种算法,该算法将水流源简化成点源,用格网的中心点表示,河道用一维的线表述,水流方向简化为 8 个方向。

东北、东、东南、南、西南、西、西北和北被定义为有效的水流方向,分别用 128、1、2、4、8、16、32 和 64 这 8 个有效特征码表示,如图 10,然后根据高程的差值决定水流流向。

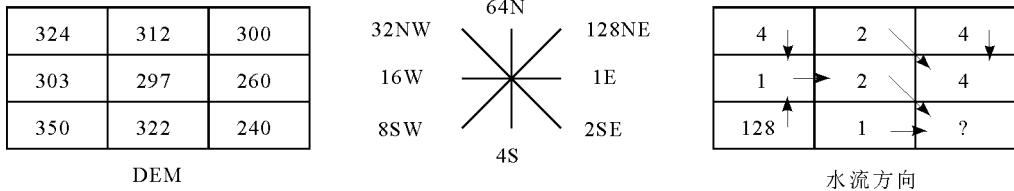


图 10 D8 算法流向规定

3.2.2 在 ArcMap 中的实现 在 ArcMap 中,Spatial Analyst 工具->水文分析->流向,计算结果如图 11。

3.3 水流累积矩阵的计算

汇流累积量矩阵表示区域地形每点的流水累积量。在模拟地表径流的过程中,汇流累积量是基于水流方向数据计算得到的。

汇流累积的基本思路:以规则格网表示的数字

高程模型每个格网上有一个单位的水量,受重力作用,水流从高向低流动,根据区域地形的水流方向数据计算每点所流过的数量总数值,便得到了每个栅格上的汇流累积量。

在 Arc Map 中的实现:点击 Spatial Analyst 工具->水文分析->流量。汇流累积量计算结果如图 12~13。

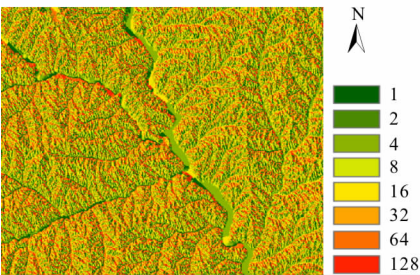


图 11 水流方向示意图



图 12 水流矩阵整体图效果

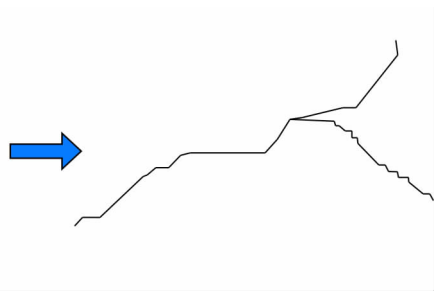


图 13 水流矩阵局部放大效果

3.4 河网阈值的确定

提取河网过程中,必须首先生成汇流累积量的栅格矩阵,然后才能在此基础上进行河网的提取,其中在累积流栅格矩阵向流量栅格矩阵转化的过程中,需要根据实际情况设置一个合理的累积流量阈值,高于该阈值的所有栅格生成一个相互连接的河网,进而对河网进行像河流分级,河流长度,河网密度等后续的处理分析。阈值的大小直接影响一系列参数的提取,所以阈值的确定,在河网的提取中起着至关重要的作用。

例如,随着设定阈值的加大,河网密度会呈现下降趋势;反之,河网密度会呈现增加趋势。合理设定阈值才能做出合理的河网提取,河网的位置,尤其是河流发育沟头的位置会伴随着阈值的变动发生改变,这将导致汇水区面积变化及河网的分布差异。作为分布式模型的一个重要输入参数,这将导致水文模型模拟的河网结果出现较大差异。所以,在运用规则格网DEM进行河网提取时,要想控制河网长度,河网密度流域面积,则要选择合理科学的累积流阈值。

河流网络是在汇流累积矩阵的基础上生成,依据汇流的累积量再选定阈值后的计算数据,单元格内的单位水量是利用每个单元的汇流累积量进行表征的,当汇流累积量值达到特定设定阈值时,就确定此格网出现在河网上,即可将这些出现在河网上的栅格赋值为1,反之则赋值为0。

3.4.1 累积阈值的确定 对于累积阈值,研究采用实例验证的方法进行确定,分别取100000,200000,300000,400000,500000,600000,700000,800000的

累积阈值进行研究区的河网自动提取。在ArcMap中,点击空间分析模>>代数计算>>栅格计算器,在计算机器中输入表达式:con(“flowacc”>const,1),表示将栅格数据flowacc中的汇流值大于某一常数const的全部赋值为1,其余值赋值为NULL。

3.4.2 河网的生成 在栅格计算器中提取的河网是栅格数据,生成河网的过程中,需要把栅格量数据转换成矢量数据。

在ArcMap中实现:点击Spatial Analyst工具->水文分析->栅格河网矢量化。确定输入河流栅格、输出流向栅格并设置存储路径,按照不同的阈值生成结果如下图14~图21。

3.5 提取河网结果的分析

3.5.1 目视对比 河网提取后需要对河网提取精度,需要检验提取河网与实际河网之间的差距,利用该地区的TM遥感影像,通过地理配准和几何纠正配准到同样的投影坐标系,与自动提取的河网流域分布图进行空间分析对比,经过对比发现当阈值为400000时,与实际情况吻合度较高。

图22是TM影像,成像是2009年1月21号,时值研究流域的枯水期,但是在遥感图像中,河流的主干道仍然是十分明显的,水体特征明显,两个主要支流出现断流现象,但依然可以分辨。河网的分布与从DEM中获得的河网效果基本相符。当阈值高于400000时,河网总长度变短,部分支流不能很好的体现;当阈值低于400000时,河网密度增大,提取的河流支流增多,与遥感影像对比可知部分支流是“伪支流”,不是真正的河网。

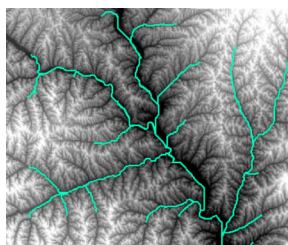


图14 阈值 800000

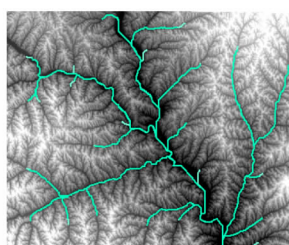


图15 阈值 700000

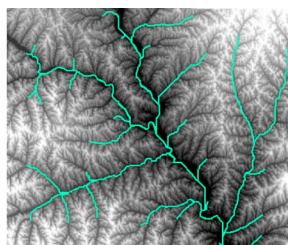


图16 阈值 600000

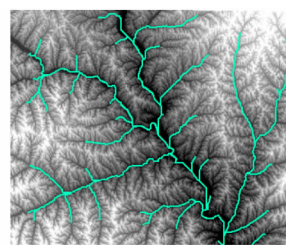


图17 阈值 500000

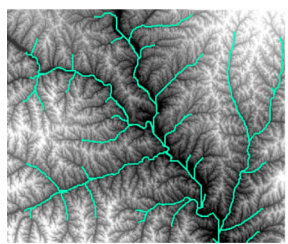


图18 阈值 400000

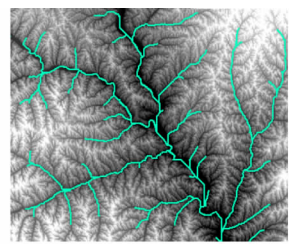


图19 阈值 300000

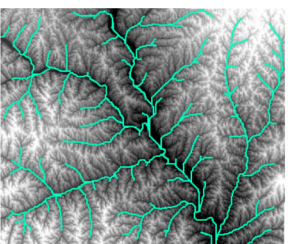


图20 阈值 200000

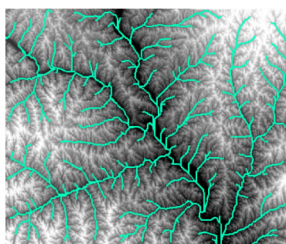


图21 阈值 100000

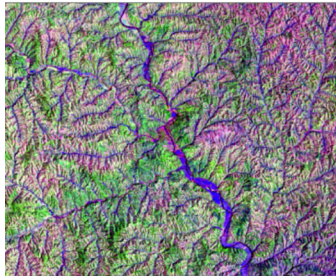


图 22 遥感影像(765)

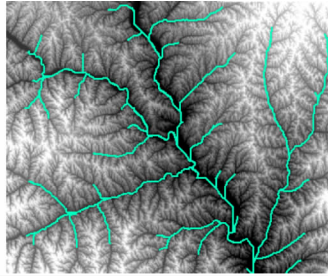


图 23 DEM 河网提取图

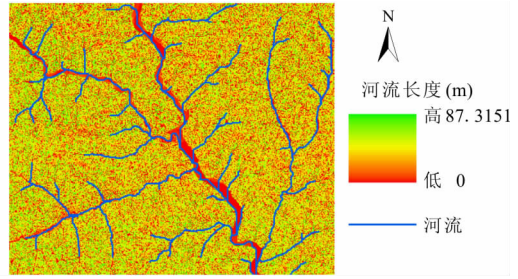


图 24 坡度与河网叠加图(图例河流长度 m)

但是,同时发现提取的河网在细节处存在许多问题,如图 24 中,坡度较低的平缓地区,尤其是在坡度在 $0 \sim 5^\circ$ 之间时,出现了比较严重的平行河网的现象。在实际情况中此处多是平坦的河谷,或是一些水利设施(水库,拦河坝等),由于 D8 算法本身的缺陷,在平地不能很好地描述水流方向,所以会出现一些与实际不符的平行河网。另外本研究的假设是研究区域范围内降水均匀,且不考虑上游来水,所以在靠近区域边缘的某些主河道也不能很好地提取,造成河网提取错误,这就要求我们用其他方法加以改正。

3.5.2 河网长度的对比 在 ArcGIS 中,将上述提取的河网文件,利用转换工具转换为 coverage 格式,然后建立拓扑关系,可以得到河网的总长度,根据阈值的不同,把不同阈值下的河流长度进行比较结果如下表 1 所示:

表 1 河网长度与河道计数对比

阈值/ m^2	总长度/m	计数	平均值/m
100000	709445.6187	359	1976.172
200000	504693.1502	175	2883.961
300000	406333.8451	117	3472.939
400000	357265.7700	94	3800.700
500000	322151.1392	73	4413.029
600000	287006.9762	57	5035.210
700000	261594.7432	49	5338.668
800000	244376.2641	40	6109.407

由表 1 可以看出,当阈值很小时,提取的河网较为复杂,累积流较小也会形成河网,而在实际中,只有地面水流达到一定数值后才会产生径流,阈值较小时产生的河网并不能真实地反映实际情况,只是一个理论模型;随着阈值的不断增大,提取的河网逐渐变得稀疏,越来越接近真实值。阈值继续增大,提取的河网逐渐变得稀疏,与实际的河网相差逐渐增大。

4 结 论

以国家基本比例尺 1:50000 数字地形图为数据源,利用等高线和高程点信息,在 ArcGIS 软件中生成研究区 5 m 分辨率的 DEM,并在 DEM 的基础上,利用 ArcGIS 中的水文分析模块对研究区流域内的水文特征、水流方向、河网信息等进行了提取,得到以下结论:

(1)利用 ArcMap 中的水文分析模块,以生成的 DEM 作为数据源,进行流域的水文信息提取,在确定科学的阈值后,其获取的理论河网模型与现实河网基本相符。在研究中,通过与遥感影像中河网的目视对比发现,阈值设定为 400000 时吻合度最高;当阈值高于此值河网支流信息遗失较多,且部分主干道也存在断流现象;当阈值低于此值时,会出现很多在现实中不存在的“伪河道”。

(2)利用 DEM 进行河网提取时会出现平行河网和主干道缺失的现象。

(3)在基于 DEM 提取河网的算法中,对上流来水的忽略,在很大程度上影响了阈值选定的准确性。若是研究区域不是完整的流域,忽略上流来水会极大影响河网提取的准确度。所以可以考虑在栅格上赋较高的水量值,代替上流来水。但是这势必影响模型的自动化程度,同时赋值的大小也有待于研究。

参考文献:

- [1] 刘怀湘,王兆印. 典型河网形态特征与分布[J]. 水利学报, 2007, 38(11):1354-1357.
- [2] 张 丽,傅旭东,王光谦,等. 黄河中游典型河网的结构自相似性[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013,53(1):24-28.
- [3] 杨达源. 自然地理学[M]. 北京:科学出版社, 2012.
- [4] 宋晓猛,张建云,孔凡哲,等. 基于流域地形地貌特征的分布式汇流方法[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(4):585-593.
- [5] 吴 用,李畅游,张成福,等. 基于 ArcGIS 和 SWAT 的山区、平原区复合地貌流域划分方法研究[J]. 干旱区地

- 理(汉文版), 2016, 39(2):413-419.
- [6] 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[J]. Journal of Hydrology, 2001, 240(3-4):225-242.
- [7] 熊立华,郭生练, Kieran M O Connor. 利用DEM提取地貌指数的方法述评[J]. 水科学进展, 2002, 13(6):775-780.
- [8] 张镛光,王克林,陈洪松,等. 基于DEM的地形指数提取方法及应用[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(6):715-719.
- [9] 王雷,汤国安,刘学军,等. DEM地形复杂度指数及提取方法研究[J]. 水土保持通报, 2004, 24(4):55-58.
- [10] 徐新良,庄大方,贾绍凤,等. GIS环境下基于DEM的中国流域自动提取方法[J]. 长江流域资源与环境, 2004, 13(4):343-348.
- [11] 蔺彬彬,张亚琼,武鹏林. GIS环境下基于DEM的三川河流域特征提取[J]. 中国农村水利水电, 2013(3):34-37.
- [12] O'Callaghan J F, Mark D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data[J]. Computer Vision Graphics & Image Processing, 1984, 28(3):323-344.
- [13] 刘学军,卢华兴,卞璐,等. 基于DEM的河网提取算法的比较[J]. 水利学报, 2006, 37(9):1134-1141.
- [14] 杜庆顺,孔凡哲,牛志刚,等. 基于DEM的河网提取方法对比分析[J]. 中国农村水利水电, 2006(8):40-41.
- [15] 易卫华,杨平. 基于DEM数字河网提取时集水面积阈值的确定[J]. 江西水利科技, 2008, 34(4):259-262.

(上接第116页)

- [4] 何月萍,杜海卫,戴松晨,等. 长河坝水电站水库水温预测研究水电站设计[J]. 2012, 28(4):64-68.
- [5] 木合塔尔·卡生木. 某大型平原水库对周边地下水的影响[J]. 水利科技与经济, 2015, 21(6):86-87.
- [6] 甘肃省水利水电勘测设计研究院. 陇南市徽县宋家湾水库工程可研报告[R]. 2016. 6.
- [7] 朱党生. 水利水电工程环境影响评价[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2006.
- [8] 朱源辉. 水库水质现象分析及水库对环境的影响[C]//福建省科协第八届学术年会水利分会论文集, 福州: 2008.
- [9] 宋策,周孝德,辛向文. 龙羊峡水库水温结构演变及其对下游河道水温影响[J]. 水科学进展, 2011, 22(3):421-428.
- [10] 宋策,周孝德,唐旺. 水库对河流水温影响的评价指标[J]. 水科学进展, 2012, 23(3):419-426.
- [11] 隋欣,杨志峰. 龙羊峡水库蓄水对水温的净影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4):154-157.
- [12] 唐旺,周孝德,袁博. 不同类型水库对库区及河道水温的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(6):184-188.
- [13] 吴吉春,薛禹群,靳孟贵. 地下水动力学[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009.
- [14] 刘金玉. 三涧堡地下水库对地下水环境影响的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2015.
- [15] 徐鑫,张克峰,曹向华,等. 中水水库对地下水环境的影响分析[J]. 山东建筑大学学报, 2013, 28(3):228-231+278.
- [16] 宋会香. 河口村水库对下游地下水环境的影响[J]. 人民黄河, 2011, 33(2):71-74.