

# 基于DEM的延河流域水文特征提取与分析

宋向阳, 吴发启, 赵龙山, 吴光艳, 张青峰

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 基于DEM数据, 依据地表径流漫流模拟算法, 使用ArcGIS软件中的水文分析工具, 提取与分析延河流域河网特征及相关信息, 并与1:25万地形图数字化水系进行分析比较。结果表明: 集水面积阈值是决定河网提取精度的关键参数, 阈值越大, 提取河网越稀疏, 反之则提取河网越密集; 随着集水面积阈值的增大, 河源数和河网密度、河流的级数、总河长等随之减少, 但主河长变化不大; 当阈值为5.51 km<sup>2</sup>时, 提取河网与实际较吻合。因此, 基于90 m分辨率的DEM数据提取延河流域水系和子流域是切实可行的, 可以作为数字流域建设与水资源管理的基础数据。

**关键词:** 数字高程模型(DEM); 延河流域; 水文特征提取; 集水面积阈值

**中图分类号:** P333; S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2012)04-0200-07

传统上, 河网信息的提取, 通常采用的是从数字化地形图或其它图中寻找水流线进而求得水系要素的方法。该方法不仅费时费力, 而且存在沟谷等级的人为确定以及低等级河网的省略等问题, 具有一定的主观性<sup>[1]</sup>。近年来, 在数字化的信息时代影响下, 水文科学领域发生一场深刻的变革, 地球空间多源水文信息的数字集成形成了数字水文<sup>[2]</sup>。国家基础地理信息数据库的建设加快了流域数字化<sup>[3]</sup>的进程, 充分利用现有的信息和有效的GIS手段, 可以揭示水文基本规律, 减少人类机械劳动, 提高水文工作效率。

目前, 水文模型研究的重点已从流域统计模型转到GIS与成熟水文模型相结合的分布式水文模型<sup>[4]</sup>的研究方面。随着GIS的日益普及和在水文模拟领域的广泛应用, 以及精确而详细的DEM数据的方便获取, 使得应用GIS平台直接从DEM中提取河网的方法得到了发展和改进, 并已经成为当前研究流域地貌信息的一种重要手段。水文要素信息是大多数地表水文分析模型的主要输入数据, 基于DEM数据提取流域水文特征, 方法简便而快捷, 可以得到任意精度下的相关数据, 完全能够满足水文模拟与生产的需要, 可为研究和开发分布式水文模型提供水文参数。

鉴于此, 本文以延河流域水文特征为研究对象, 在GIS技术的支持下, 以DEM数据为基础对延河流域的水文特征进行提取与分析, 以期为该流域数字化建设与水资源优化管理提供支持。

## 1 研究区域概况

延河流域地处陕西省偏北部, 位于东经108°41'~110°29', 北纬36°27'~37°58', 是黄河中游水土流失最严重的区域之一<sup>[5]</sup>。延河发源于靖边县天赐湾乡周山, 是黄河一级支流, 由西北向东南流经志丹、安塞、宝塔、延长等四县区, 最终在延长县南河沟乡凉水岸附近汇入黄河, 全长286.9 km, 流域面积7 680 km<sup>2</sup>, 多年平均径流总量2.89亿m<sup>3</sup>。主要支流有杏子河、西川河、蟠龙川、南川河、平桥川等。流域地势西北高而东南低, 平均海拔高度950 m。以安塞县的化子坪和宝塔区的甘谷驿为界, 可以将流域划分成上、中、下游河区。上游为梁峁丘陵沟壑区, 地形陡峭, 河谷狭窄; 中游为峁状丘陵沟壑区, 河谷明显展宽, 阶地发育; 下游多为破碎塬区, 冲沟发育。本研究所采用的DEM数据由美国国家航空航天局官方网站提供, 分辨率为90 m。

## 2 研究方法

从DEM数据中直接提取河网及相关流域信息, 是分布式水文模型开发与应用的基础<sup>[6]</sup>。由DEM自动获取水系和子流域水文特征, 可以便捷地获取流域水文参数以及水文特征空间分布和变化。目前基于DEM提取流域特征信息应用最为广泛的方法仍然是1984年Mark等<sup>[7]</sup>提出的地表径流漫流模拟算法, 通过模拟地表径流在地表的流动来产生水系。这种方法主要是依据DEM栅格单元和相邻八个栅

收稿日期: 2011-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(40871133)

作者简介: 宋向阳(1985—), 男, 陕西渭南人, 硕士研究生, 主要从事GIS在水土保持中的应用研究。E-mail: sxy1985dx@163.com。

通讯作者: 吴发启(1957—), 男, 陕西黄陵人, 博士生导师, 主要从事水土保持与流域管理方面的研究。E-mail: wufaqi@263.net。

格之间的最大坡度来确定每一个栅格的水流方向,然后根据水流方向数据来计算每个栅格在水流方向

上的上游汇水面积,通过设置汇水面积阈值,将不低于该阈值的栅格标记为水系的组成部分。

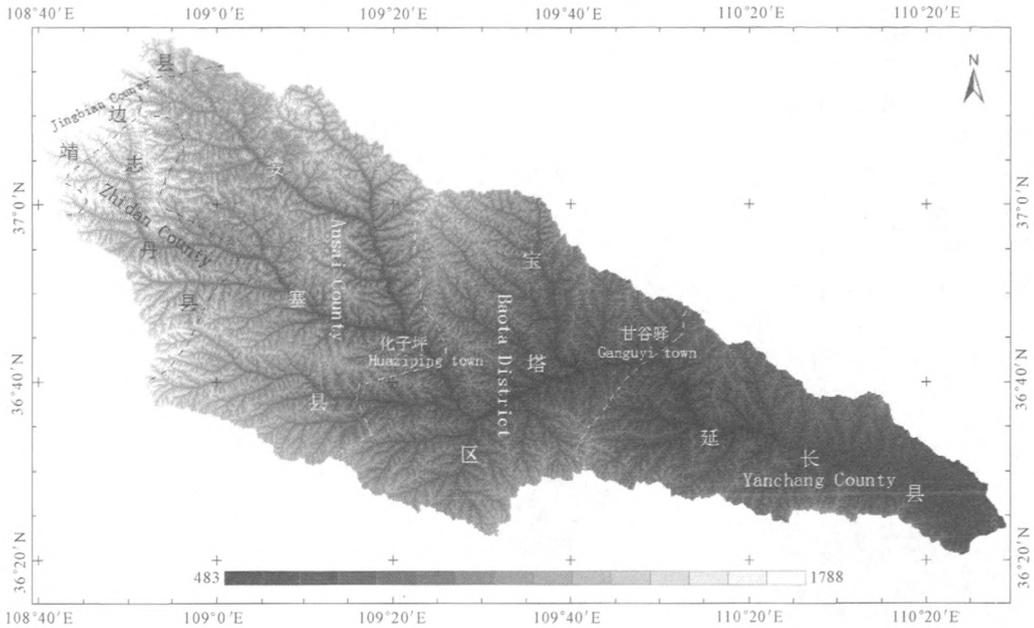


图 1 延河流域 DEM

Fig.1 DEM of Yanhe watershed

### 2.1 数据预处理

原始的 DEM 数据中通常都有洼地或尖峰,它们是 DEM 数据中的“缺陷”,会给流向和流域边界的确定造成困难<sup>[8]</sup>。但是,并不是所有的洼地都是由于数据的误差造成的,有很多洼地也是地表形态的真实反映。因此,在进行洼地填充之前,必须计算洼地深度,判断哪些地区是由于数据误差造成的洼地而哪些地区又是真实的地表形态,然后在进行洼地填充的过程中,设置合理的填充阈值。洼地填充是一个不断反复的过程,当一个洼地区域被填平之后,这个区域与附近区域再进行洼地计算,可能会形成新的洼地。所以,洼地填充通常要进行多次,直到最后所有的洼地都被填平,新的洼地不再产生为止。

### 2.2 流向计算

水流方向是指水流离开栅格时的方向,它决定了地表径流的方向及栅格间流量的分配。ArcGIS 中的水流方向是采用 D8 算法<sup>[7]</sup>,也就是最大距离权落差来计算水流方向。某一栅格的水流方向为与之相邻的 8 个栅格中坡度最陡的栅格,分别表示东、东南、南、西南、西、西北、北、东北 8 个方向,如图 2 所示。该方法对自然状态下的水流方向进行了

极大的概括,简化了水流方向的无穷多种可能性,导致了水流偏向某个栅格。但是,由于该方法对 DEM 的运用和处理简单,故而实用性强,是目前应用范围最广泛的方法。

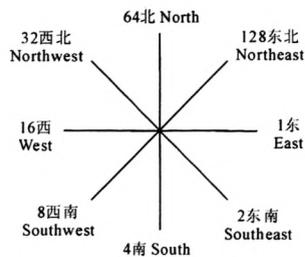


图 2 水流方向编码

Fig.2 Code about flow direction

### 2.3 汇流累积栅格计算

在地表径流模拟过程中,汇流累积量是基于水流方向数据计算而来的<sup>[9]</sup>。对每一个栅格来说,其汇流累积量的大小代表着其上游有多少个栅格的水流方向最终汇流经过该栅格,汇流累积的数值越大,该区域越易形成地表径流。区域汇流累积数值矩阵表示区域地形每点的流水累积量,假设以规则格网表示的数字地面高程模型每点处有一个单位的水

量,按照自然流水从高处流往低处的自然规律,根据区域地形的水流方向数字矩阵计算每点处所流过的水量数值,便可得到该区域汇流累积数值矩阵。

### 2.4 河网提取与分级

DEM 中某一栅格点若能形成水系,则必须存在一定规模的上游给水区,因此可以给定一个适当的最小集水面积阈值<sup>[10]</sup>,上游汇水面积等于最小集水面积阈值的栅格被定义为河源,上游汇水面积大于最小集水面积阈值的栅格被定义为水系。简单的说,通过设置合理阈值,将汇流栅格中所有大于或等于最小集水面积阈值的栅格提取出来,就可以得到河网。

河网分级是对一个线性的河流网络进行分级的

数字标识。利用地表径流模拟的思想,不同级别的河网首先是它们所代表的汇流累积量不同,级别越高的河网,其汇流累积量也越大,那么在水文研究中,往往被认为是主流,而那些级别较低的河网则是支流<sup>[9]</sup>。本文采用 Strahler 河流分级法,如图 3,它是将所有河网弧段中没有支流河网弧段分为第 1 级,两个 1 级河网弧段汇流成的河网弧段为第 2 级,如此下去分别为第 3 级、第 4 级,一直到河网出水口。在这种分级中,当且仅当同级别的两条河网弧段汇流成一条河网弧段时,该弧段级别才会增加,对于那些低级弧段汇入高级弧段的情况,高级弧段的级别不会改变。

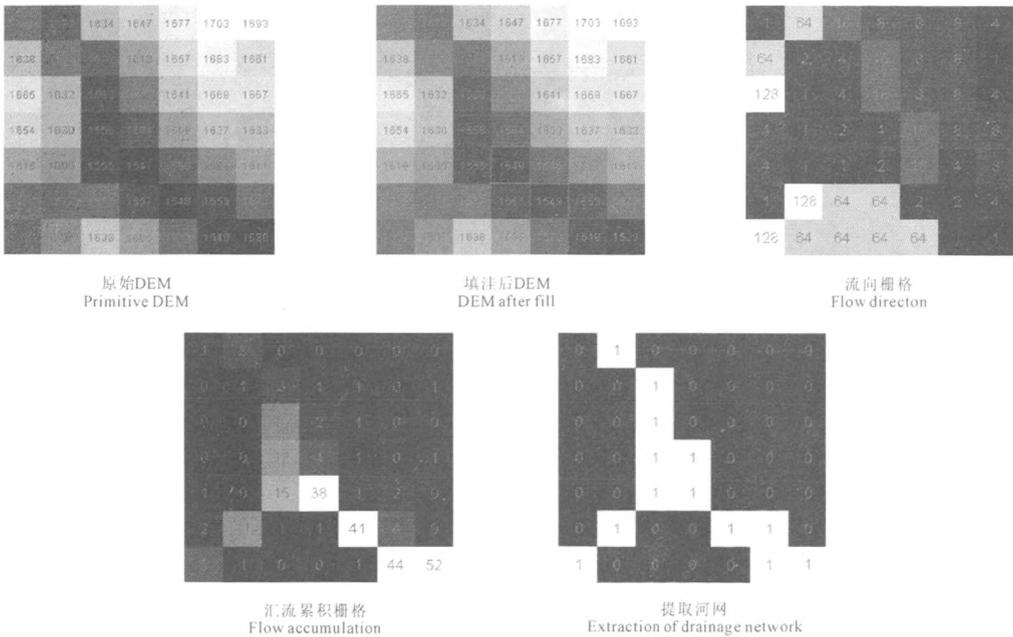


图 3 Strahler 河网分级示意图

Fig.3 Stream order of Strahler

### 2.5 子流域划分

子流域划分的基本思想<sup>[11]</sup>是:先确定一个出水点,也就是该集水区的最低点,然后结合水流方向数据,分析搜索出该出水点上游所有流过该出水口的栅格,直到所有的该集水区的栅格都确定了位置,也就是搜索到流域的边界,分水岭的位置,它是每一条河网弧段集水区域,它将一个大的流域盆地按照河网弧段将其分为一系列小的集水盆地。河网提取过程中,DEM 数值矩阵变化情况如图 4 所示。

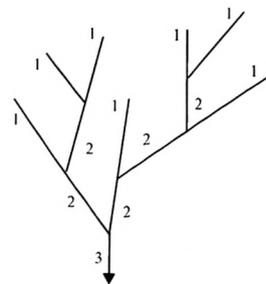


图 4 河网提取过程栅格矩阵数值变化

Fig.4 Changes of value of matrix in the process of extraction of drainage network

### 3 结果与分析

#### 3.1 集水面积阈值对提取河网的影响

集水面积阈值的设定在河网的提取过程是很重要的,它不仅决定了河流的源头并直接决定生成的

数字河网形态<sup>[12]</sup>。本文分别取集水面积阈值为1.62、3.24、4.86、6.48、9.72、12.96 km<sup>2</sup>进行河网提取,得到不同阈值下延河流域河网如图5,通过比较分析,可以看出集水面积阈值不同,生成河网的详细程度差异较大。

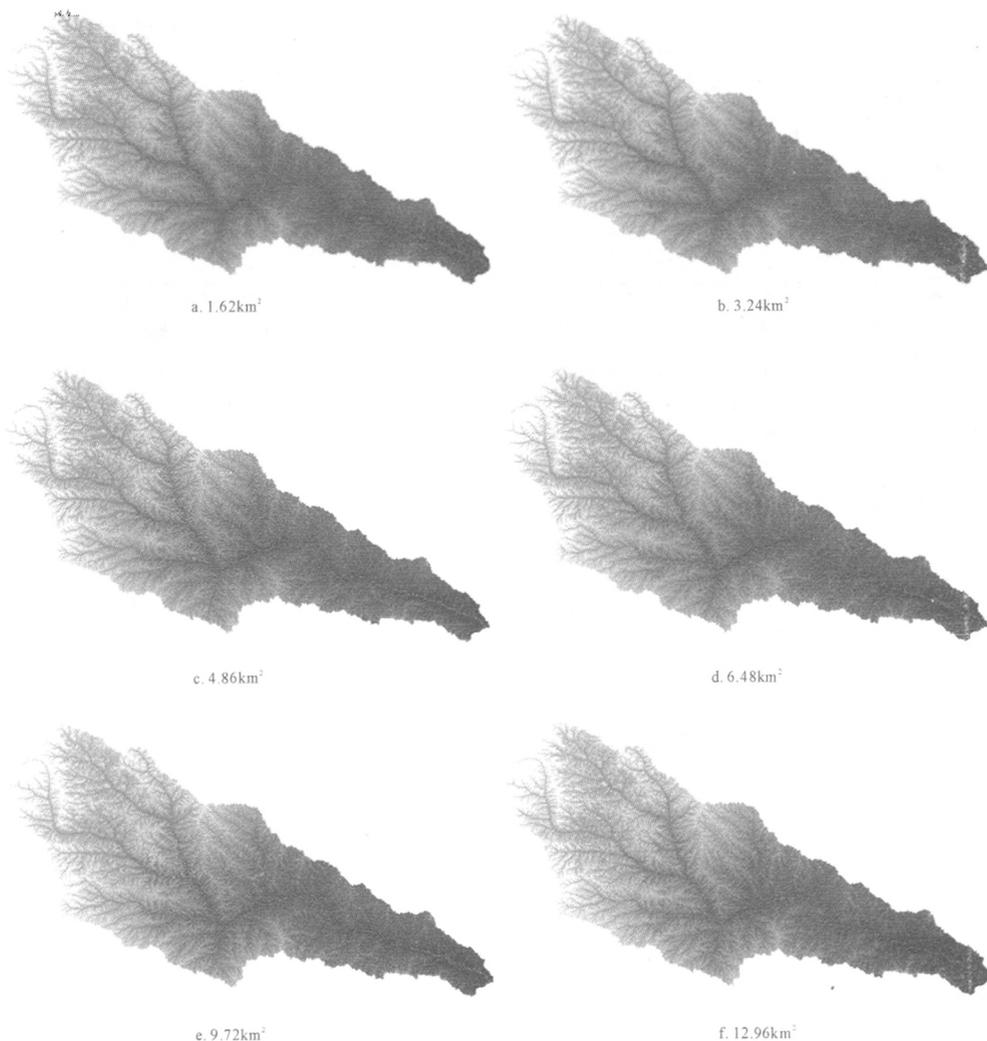


图5 不同阈值提取河网

Fig.5 Drainage network in different threshold

3.1.1 集水面积阈值越小,提取河网越密集;反之则提取河网越稀疏。图中可以明显看出,随着集水面积阈值增大,提取河网越来越稀疏。这是因为集水面积阈值越大,在汇流累积栅格图层中超过集水面积阈值的栅格就越少,河源距出口的距离缩短,河道数目减少,河网就相对稀疏。当阈值为1.62 km<sup>2</sup>时,提取河网不仅密集,而且一二级伪水道较多。当

阈值增加到12.96 km<sup>2</sup>时,河网稀疏的同时,部分低等级的河道消失,主河长也有显著缩短趋势,这些都与实际河网不相符合。

3.1.2 随着集水面积阈值增大,河源数和河网密度、河流的级数和总河长也随之发生相应变化。表1计算结果显示,当集水面积阈值由1.62 km<sup>2</sup>增至3.24 km<sup>2</sup>时,河源数由1855条减少到950条,降低了49%,同时,河网密度、总河长也都分别降低了

28%、28%。当阈值由 3.24 km<sup>2</sup> 增加至 4.86 km<sup>2</sup> 时,河源数、河网密度、总河长都分别降低 32%、17%、17%。而当阈值由 9.72 km<sup>2</sup> 增至 12.96 km<sup>2</sup> 时,河源数、河网密度、总河长却分别只降低 29%、

16%、13%。但主河长一直变化不大。这表明,随着阈值增大,河源数、河网密度、总河长都随之降低,但是降低的趋势明显越来越缓慢。

表 1 流域河网特征随集水面积阈值的变化

Table 1 Changes of drainage network characteristics with threshold

阈值(km <sup>2</sup> ) Threshold	河源数(条) Riverhead	河网密度(km/km <sup>2</sup> ) Drainage density	主河长(km) Length of main river	支流总长(km) Total length of all branch	总河长(km) Total length
1.62	1855	0.57	267.39	4086	4353
3.24	950	0.41	267.35	2884	3151
4.86	649	0.34	262.17	2349	2611
6.48	500	0.30	261.47	2013	2274
9.72	317	0.25	261.47	1621	1882
12.96	224	0.21	260.43	1376	1636

为进一步研究河网密度和河源数与集水面积阈值之间的相关性,本文分别采用指数、线性、对数、多项式、乘幂 5 种函数进行趋势分析,发现选用乘幂函数进行趋势分析时,两者的拟合度最好, $R^2$  分别为 0.998 和 0.997。图 8 可以看出,当阈值增大时,最初的河网密度减小很快,然后出现一个突变后趋于

平缓,河源数的变化趋势与河网密度基本一致。孔凡哲<sup>[13-14]</sup>等认为河源密度变化趋于平缓时对应最合理的集水面积阈值,因此,可根据该阈值提取河网,从而避免反复试验阈值的繁琐过程,也能够保证提取结果的准确性。

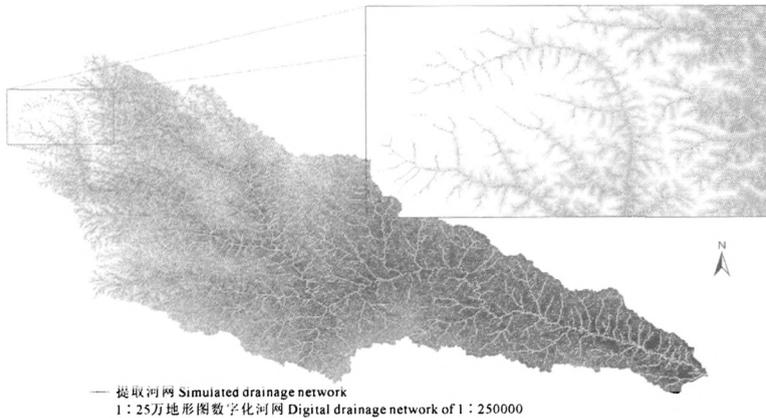


图 6 提取河网与 25 万地图水系比较

Fig.6 Comparison between simulation and digital drainage network of 1:250000

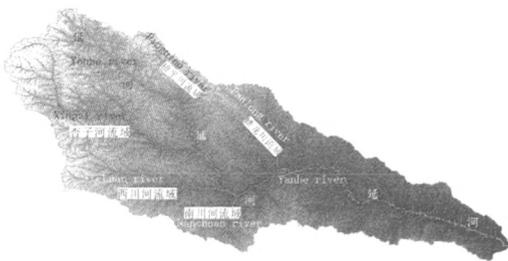


图 7 提取子流域

Fig.7 Sub watershed from DEM

3.1.3 各级河流的总数也随集水面积阈值的增大而减少,1 级和 2 级河流减少明显。表 2 的计算结果显示,当集水面积阈值由 1.062 km<sup>2</sup> 增至 3.24 km<sup>2</sup> 时,1 级河流的条数由 1 855 条迅速减少到 950 条,减少了 905 条,2 级河流条数由 815 条减少到 436 条,相对变化 379 条;3、4、5 级河流的条数分别相对变化 285 条、138 条和 48 条。当阈值增至 4.86 km<sup>2</sup> 时,各级河流数量也有所变化,除 1、2 级河流显著减少外,其他各级河流变化不大,同时,6 级河流消失。当增加到 12.96 km<sup>2</sup> 时,5 级河网也随之消失。这种

变化趋势表明,随阈值增大,提取河网形态结构有显著变化。因此,流域内总的河流级数以及各级河流

的数量也是确定最佳阈值的参考。

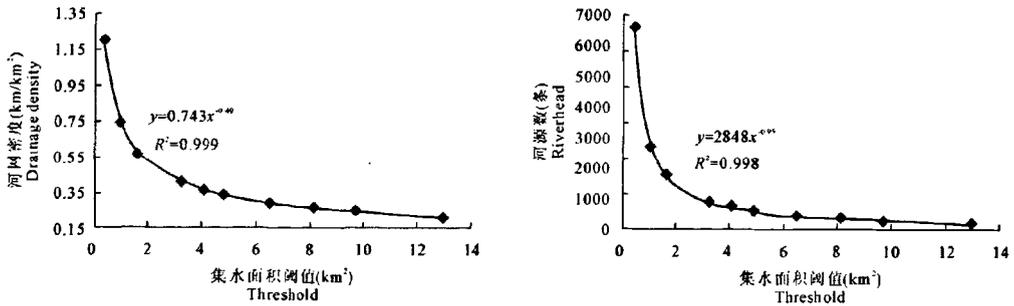


图 8 河网密度、河源数随阈值的变化

Fig.8 Changes of the drainage density and riverhead whit threshold

表 2 河流级别特征随集水面积阈值的变化

Table 2 Changes of drainage class characteristics with threshold

分级 Class	集水面积阈值 Threshold (km <sup>2</sup> )					
	1.62	3.24	4.86	6.48	9.72	12.96
1 级(条) First class	1855	950	649	500	317	224
2 级(条) Second class	815	436	278	208	138	111
3 级(条) Third class	518	233	204	136	93	91
4 级(条) Fourth class	325	187	104	89	55	1
5 级(条) Fifth class	101	53	1	1	1	0
6 级(条) Sixth class	1	1	0	0	0	0

3.2 提取河网与数字化河网比较分析

根据图 8 和表 2 的计算结果,经过多次反复尝试,当阈值为 5.51 km<sup>2</sup> 时,提取的延河流域河网与

实际河网吻合程度比较好,尤其是主干河道,但也存在少许差异,且差异主要存在于二、三级河道。

表 3 提取主要支流与数字化结果比较

Table 3 Comparison between extracted value and actual value

河名 River name	流域面积 Watershed area (km <sup>2</sup> )			主河长 Length of main river (km)		
	提取值	实测值	相对误差 (%)	提取值	实测值	相对误差 (%)
	Analog value	Actual value	Relative error	Analog value	Actual value	Relative error
延河 Yanhe	7688	7680	0.10	266.98	264.42	0.97
杏子河 Xingzi	1486	1483	0.20	100.12	97.22	2.98
西川河 Xichuan	809	809	0.00	61.26	59.37	3.18
蟠龙川 Panlong	587	573	2.44	50.72	49.55	2.36
南川河 Nanchuan	430	430	0.00	27.01	27.27	0.95
平桥川 Pingqiao	329	329	0.00	38.60	37.31	3.46

注:河长和流域面积来源于中国水系大辞典<sup>[15]</sup>。

Note: River length and watershed area from the dictionary of China water systems<sup>[15]</sup>.

从图 6 和图 7 中可以看出,在山地丘陵区提取河网与实际河网吻合效果明显高于平坦地区。这主要是由于丘陵区一般地势较高,落差较大,受人类活动影响较小,下垫面较为均匀,而 ArcGIS 中所采用的 D8 算法恰恰是基于下垫面均一的前提下,在山地丘陵区能够较好地计算水流方向,但在平坦地区

现有算法无法考虑随机因素对河流的影响,提取的水系一般比较平直,而自然水系往往是随机地流过平原区,这就给流域的分布和面积量算带来一定的误差。

为了进一步验证河网提取精度以及主要子流域河网的准确性,在 ArcGIS 软件中经过计算可得到表

3. 从表中可以看出,除蟠龙川以外的其他主要支流的流域面积与实际值基本一致,提取主要支流的主河长略有差异,但相对误差都在 4% 以下,总体可以满足实际应用需要。

#### 4 结 论

通过对延河流域水文特征的提取与分析得出如下结论:

1) 集水面积阈值是决定河网提取精度的关键参数,它不仅决定了河流的源头并直接决定提取的河网形态。集水面积阈值越小,提取河网越密集;反之则提取河网越稀疏。对于延河流域,积水面积有效阈值在 4.86 ~ 6.48 km<sup>2</sup> 之间。

2) 随着集水面积阈值的增大,河源数、河网密度和总河长都随之减小,但减小的趋势明显减弱。同时,随着集水面积阈值的增大,各级河流的总数也不断减少。但主河长一直变化不大。

3) 随着集水面积阈值的增大,河网密度最初减小很快,然后出现一个突变后趋于平缓,河源数的变化趋势与河网密度基本一致。可以根据河网密度或河源数变化趋于平缓时对应的集水面积阈值确定河网提取的最佳阈值。

4) 当阈值为 5.51 km<sup>2</sup> 时,提取河网与实际较吻合,尤其是主干河道。从流域水系和子流域面积的精确性上来看,该流域主要支流的流域面积和主河长与实际值基本一致,可以满足实际应用需要。

#### 参 考 文 献:

- [1] 刘刚,赵荣.基于 DEM 的澜沧江流域水文信息提取方法的研究[J].地理信息世界,2007,(1):56-59.
- [2] 刘新仁.数字水文系统建设——信息时代的水文技术变革[J].水文,2000,20(4):5-8.
- [3] 任立良,刘新仁.基于数字流域的水文过程模拟研究[J].自然灾害学报,2001,9(4):45-52.
- [4] 王中根,刘昌明,左七亭.基于 DEM 的分布式水文模式构建方法[J].地理科学进展,2002,21(5):432-439.
- [5] 王丽霞,任志远.陕北延河流域基于 GLP 模型的流域水土资源综合配置[J].农业工程学报,2011,27(4):48-53.
- [6] 李 翀,杨大文.基于栅格数字高程模型的河网提取及实现[J].中国水利水电科学研究院学报,2004,2(3):208-214.
- [7] O'Callaghan J F, Mark D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data[J]. Graphics and Image Processing, 1984,28:323-344.
- [8] 徐新良,庄大方,贾绍凤.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.
- [9] 汤国安,杨 昕.ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M].北京:科学出版社,2007:429-445.
- [10] 任立良,刘新仁.基于 DEM 的水文物理过程模型研究[J].地理研究,2000,19(4):369-376.
- [11] 叶爱中,夏 军,王钢胜,等.基于数字高程模型的河网提取及子流域生成[J].水利学报,2005,36(5):531-537.
- [12] 杨 邦,任立良.集水面积阈值确定方法的比较研究[J].水电能源科学,2009,27(5):11-14.
- [13] 孔凡哲,李莉莉.利用 DEM 提取河网时集水面积阈值的确定[J].水电能源科学,2005,23(40):65-68.
- [14] 杨 邦,任立良.集水面积阈值确定方法的比较研究[J].水电能源科学,2009,27(5):11-14.
- [15] 朱道清.中国水系大辞典[M].山东:青岛出版社,2007:326-382.

## Extraction and analysis of hydrological characteristics of Yanhe watershed based on DEM

SONG Xiang-yang, WU Fa-qi, ZHAO Long-shan, WU Guang-yan, ZHANG Qing-feng  
(College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** According to the algorithm for cross flow simulation of surface runoff combined with the tool of hydrological analysis in ArcGIS software, hydrological characteristics of river system in Yanhe watershed and related information were extracted based on the DEM data and were also compared with the digital water system on 1:25 topographic maps. The results showed that the drainage water threshold was the key parameter for the extraction accuracy of water system, and the greater of drainage water threshold, the fewer and thinner of extracted water system; the smaller of drainage water threshold, the more concentrated of extracted water system vice versa. The number of river source, density of water system, class of river and the total river length decreased as drainage water threshold increased, but the main river length changed slightly. When threshold was 5.51 km<sup>2</sup>, water system extracted was relative coincident with the actual condition. Hydrological characteristics of river system in watershed and sub-watershed of Yanhe watershed were extracted based on the DEM data with 90 m resolution, which was feasible and could provide service for the construction of digital watershed and the management of basin water resources.

**Keywords:** digital elevation model (DEM); Yanhe watershed; extraction of hydrological characteristics; drainage water threshold