

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2017.06.02

基于 DEM 和 ArcGIS 的泾河流域水文特征提取研究

姚炳光^{1,2}, 周维博^{1,2}

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 基于 DEM 数据, 在 ArcGIS 环境下, 提取泾河流域的坡度、坡向地形特征以及不同集水阈值下的流向、河网密度、河源数等水文信息。结果表明: 集水阈值和河网密度、汇流面积之间存在幂函数关系, 阈值越大, 河网越稀疏; 对其二阶求导确定了流域的最佳阈值为 8000, 避免了以往确定阈值的主观随机性。运用 ArcGIS 嵌套软件 TauDEM 提取了最佳阈值的河网, 并利用 Strahler 法对河网进行了分级。提取的河网与泾河自然水系基本吻合, 流域地形水文特征符合流域概况, 可直接作为水文模型参数, 为泾河流域的分级管理提供数据支持, 该方法提高了建立流域水文模型的效率, 成本低且精度高。

关键词: DEM; ArcGIS; 水文特征; 河网提取; 集水阈值; 泾河流域

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)06-0008-06

Research on hydrological characteristics extraction of Chanba Basin based on DEM and ArcGIS

YAO Bingguang^{1,2}, ZHOU Weibo^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Based on DEM data in ArcGIS environment, the gradient, topographic features of the slope in Chanba basin, the flow direction, river network density and the number of rivers under different water catchment threshold were extracted. The results showed that the relation between drainage threshold and drainage density or watershed area followed a power-exponential function, and the higher the threshold value was, the sparser the network was. The optimum threshold value of the basin was 8000, which determined by the second order derivative, which avoided the subjective randomness. The best threshold of river network was extracted by ArcGIS nested software TauDEM, and the river network was stratified by Strahler method. The extracted river network matches well with Chanba natural water system. The topography and hydrology characteristics of the basin are in line with the general situation of the basin, which can be used as hydrologic model parameters directly to provide data support for the ecological environment management of Chanba River Basin. The method improves the efficiency of the hydrological model, and has the advantage of high precision and low cost.

Key words: DEM; ArcGIS; hydrological characteristics; extraction of stream network; drainage area threshold; Chanba River basin

近年来, 水文模型的研究重点已经从流域水文统计模型转到以 GIS 与水文机理模型相结合的分布式水文模型研究方面^[1-2]。随着 GIS 技术在水文模拟领域的广泛应用, 可以直接利用 DEM (Digital Elevation Model) 对流域地形特征和水系特征两个重要

部分进行提取分析, 得到流域的坡度、坡向等地形参数以及河流水系分布、分级等水文要素信息^[3-4]。地形参数与水文要素信息可为研究和开发水文模型提供参数基础^[5]。基于 DEM 数据提取流域水文特征过程中, 最重要的就是阈值的确定^[6], 而以往研

收稿日期: 2017-06-28; 修回日期: 2017-07-19

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (12120113004800)

作者简介: 姚炳光 (1992-), 男, 山西平遥人, 硕士研究生, 主要从事水文及水资源规划研究。

通讯作者: 周维博 (1956-), 男, 陕西乾县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水资源规划与地下水等。

究多通过对不同阈值下提取的河网进行对比分析^[7-8],不同汇流累积量阈值条件下提取的水系分形维数^[9-10],进而确定合适的阈值。本文基于研究区 DEM 数据提取流域水文信息,运用数理方法计算汇流累积量与河网密度和流域面积的二阶导数关系确定河网提取阈值,最终提取得到与实际流域最吻合的水系。

1 研究区概况

泾渭河流域位于西安市东部,东经 109°00′ ~ 109°47′、北纬 33°50′ ~ 34°27′之间,两河均从秦岭北麓发育。流域南北长约 78 km,东西宽 50 km;流域降水分布由北向南逐渐增加,趋势明显^[11],多年平均降水量为 19.87 × 10⁸ m³,多年平均地表水资源量 6.88 × 10⁸ m³。泾渭流域地貌类型复杂多样,从上游至下游依次有秦岭山区、浅山丘陵区、台塬区和冲积平原区 4 种类型,区内河网水系纵横^[12]。本文拟以泾渭河流域为例,进行流域 DEM 数字河网的提取研究。

2 数据与方法

2.1 数据基础

本文所用的 DEM 数据是从地理空间数据云下载拼接后依据泾渭河流域边界裁剪获得,其分辨率

为 30 m。无洼地的 DEM 数据是进行流域水文分析的数据基础^[13]。因此实际提取过程中,必须将洼地进行填充,利用 ArcGIS 中水文分析的 Fill Sink 工具,对裁剪后的原始 DEM 经过多次填洼直到不再产生新的洼地。

2.2 D8 与 Dinf 算法

D8 算法是一种使用广泛、简单的单向判断法,如图 1 中所示,计算中心单元与周边 8 个单元之间的高程落差 P,具有最大 P 值(图 1 为 +26)的邻域单元方向即为流向^[14],其最大优势是快、运算效率高,集成于 ArcGIS 等主流 GIS 环境下。

Dinf (D - Infinity)算法又称 D - ∞ 算法,是 Tarboton^[15](1997 年)综合 Lea^[16]、DEMON^[17]算法的优点提出的。Dinf 算法的基本思想如图 2 所示,计算出中心与周边各单元形成的三角坡度,最大三角坡度即为该点的坡度,该三角形的坡向就是流向。将流向所指的两个下游格网作为其流量分配单元,依其与流向的关系进行分配流量^[14]。如图 2 所示,α 为流向角度;β₁、β₂ 与 β 的比值用于确定中心分配给格网 4、5 的水量。该算法最大优势是提取的河网圆滑自然,更贴近于实际河网,且具有一定的稳定性,但运算速度较慢,程序较复杂,集成到了 TauDEM 等软件中。

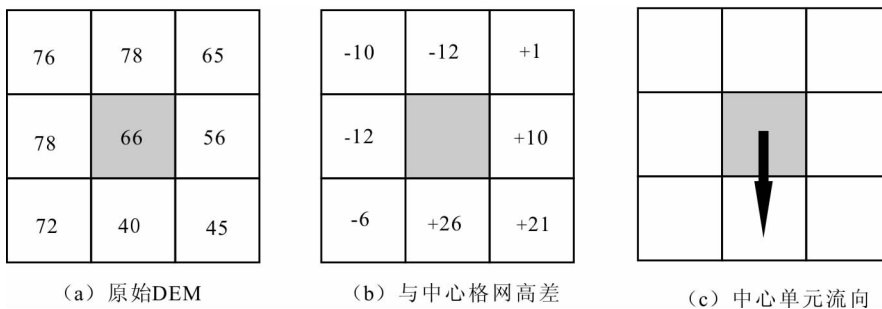


图 1 D8 算法示意图

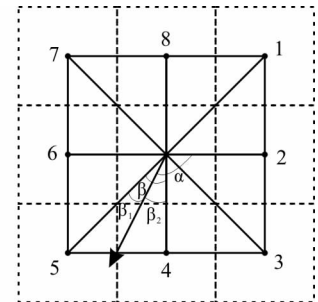


图 2 Dinf 算法示意图

本文通过将两种算法的优势结合,利用 D8 的“快”确定最佳阈值,再通过 Dinf 算法提取更圆滑、切近实际的河网,既加快效率,又提高精度。

2.3 流域信息提取

2.3.1 流域地形分析 坡度、坡向是流域地形特征 2 个重要因子,也是建立水文模型的基础。坡度表示地表倾斜程度^[18],坡向则表征了某点高程值改变量的最大变化方向。ArcGIS 中求解坡度、坡向运用拟合曲线面法,求解每点坡度、坡向的公式如下:

$$S = \tan \sqrt{S_x^2 + S_y^2} \quad (1)$$

$$A = S_x / S_y \quad (2)$$

式中: S 为坡度; A 为坡向; S_x 为 x 方向上的坡度; S_y 为 y 方向上的坡度。

坡度可以反映地形的起伏状况,一定程度上可以衡量水土流失,是分布式水文模型和区域土地规划等的基础数据,尤其对于区内有众多黄土台塬的泾渭流域来说,十分重要。坡度提取结果见图 3,研究区内最大坡度大于 70°,位于秦岭山区。由南往北,坡度呈明显减小趋势,到流域下游平原区处坡度 < 20°。研究区中部即为广阔的黄土塬地区,北部坡度较大,是应防范水土流失的重点区域。坡向影响区域降水与生态等,其取值范围为 0° ~ 360°,以正

北方向为 0° ,按顺时针方向计算,提取结果见图4。从坡度坡向图4可以看出,两河河谷可以明显辨别,流域内地形复杂多样,南部为坡向多变、坡度较大的山区,中部为纵深很长的丘陵,坡向清晰可辨;北部为坡度平缓的冲积平原,坡向较难辨析。结果表明:在平原区提取坡向精度要远远低于山区。

2.3.2 水流方向的确定 ArcGIS中采用D8算法计算水流方向,打开空间分析工具箱中的水文工具集下的Flow Direction工具,输入处理后的无洼地DEM,通过计算生成流域的流向栅格文件。

2.3.3 汇流累积量的计算 通过计算汇流累积量判定其汇流能力,某栅格汇流累积值代表经上游栅格汇流至该栅格的数量多少,其数值越大意味着该处越易形成径流,从而去判别河谷与分水岭。应用Hydrology工具集下的Fill Accumulation工具,以流向栅格文件为输入数据,可得到汇流累积量(即汇流至该栅格的栅格总数量)。

2.3.4 河网提取与分级 河网提取是基于汇流累积量的计算,将所有汇流累积量大于最小集水阈值的栅格提取出来的网络就是河网。阈值直接影响数字河网的密度和形态,确定符合研究区地形条件的阈值是提取河网的关键。以往确定阈值主要是通过反复对比不同阈值提取的河网,主观判断最佳阈值。本文将利用汇流累积量阈值与河网特征的二阶导数函数确定河网合适的提取阈值,避免了以往方法的主观性。确定阈值后,利用ArcGIS的嵌套软件TauDEM(Terrain Analysis Using Digital Elevation Models)进行Dinf算法的流向计算流量分配、设定阈值生成河网、河网矢量化。其中,DEM填洼处理、设定阈值生成河网以及河网矢量化利用ArcGIS软件实现,Dinf流向计算与Dinf流量分配利用TauDEM软件实现(见图5)。

河网分级是对线性河网以数字标识的形式划分等级的水文分析方法。在ArcGIS的水文分析中,有两种分级方法:Strahler、Shreve分级法。两种分级方法是河流分级时最为常用的方法,具体方法如图6所示。本文宜采用Strahler分级法,旨在判断流域的主干河流,确定各级河源数,为水文模型进一步划分子流域建立提供数据基础,对后期河流的分级管理与生态恢复提供指导。

3 研究结果

3.1 阈值对河网特征的影响

集水阈值的设定不仅决定了河流的源头并直接

决定着生成的河网形态。利用Hydrology水文处理工具,分别设定1000,2000,3000,...12000共12个汇流累积量阈值生成栅格河网。从水流累积量图层中提取不同阈值下产流流域河网,结果对比见图7,通过属性表计算其河流长度、河网密度、汇流面积与河源数等水文信息,见表1。

由图7可看出,随着集水阈值增大,河流长度、河网密度、河流的分级和汇流面积等河网特征随之发生相应变化。由表1可知,当汇流阈值由1000增至3000时,河源数由912减少到325条,减少了64%,同时,河网密度、河流长度分别降低了42%、42%;当阈值由3000增加至5000时,河源数由325减少到193条,减少了41%,同时,河网密度、河流长度分别降低了25%、25%;当阈值由5000增加至7000时,河源数、河网密度、河流长度分别降低了40%、18%、19%;当阈值由7000增加至10000时,降低了33%、18%、15%;当阈值由10000增加至12000时,降低了19%、8%、7%。阈值不断增大的同时,河网特征降低率却变小,河网趋于稳定。当河网阈值为1000时,河网水系密集,存在很多伪河道,需要去进一步提取;当河网增大到10000以上后,基本变为主干河流,众多支流消失,不符合实际情况。

由表1、图8(a、b、c、d、e、f)可以看出随着阈值增大,河流长度、河网密度、河源数都呈下降趋势,但降低的趋势明显越来越缓慢,最后基本变为主干河流,趋于稳定。

3.2 河网特征分析与阈值确定

以往设定阈值提取河网多为人为设定,且需要反复试验,十分繁琐,主观性强且精准度不能保证。本文分别采用指数、对数、多项式与幂函数等函数对汇流累积量与河网密度、汇流面积进行趋势分析,以确定提取河网的最佳阈值,发现幂函数拟合性最好。由表1的数据得到阈值与河网密度、汇流面积之间的幂函数关系,拟合度 R^2 分别为0.9985和0.9983。

$$y_1 = 30.126x^{-0.526} \quad (R^2 = 0.9985) \quad (3)$$

$$y_2 = 1419x^{-0.527} \quad (R^2 = 0.9983) \quad (4)$$

式中: y_1 为河网密度, km/km^2 ; y_2 为汇流面积, km^2 ; x 为阈值。

对河网密度和汇流面积的幂函数关系求二阶导数:

$$y_1'' = 24.181x^{-2.526} \quad (R^2 = 0.9998) \quad (5)$$

$$y_2'' = 1141.9x^{-2.527} \quad (R^2 = 0.9998) \quad (6)$$

将阈值代入方程(5)、(6)得到汇流累积量阈值与河网密度、汇流面积二阶导数的关系(见图9)。由图9可见,当阈值增大时,最初河网密度缩减很快,随后出

现突变趋于平缓,在 8000 处出现拐点,汇流面积、河源数的趋势与河网密度基本一致。杨邦等^[19]、常直杨

等^[20]研究认为河网密度趋于平缓处对应最合理的集水阈值,故选取阈值为 8000 为最合理集水阈值。

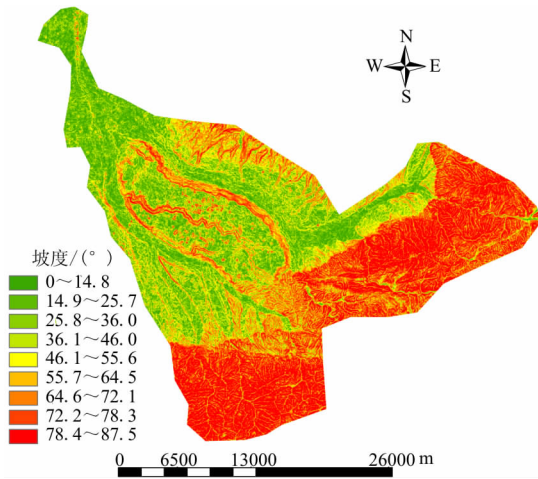


图 3 泸灞流域坡度图

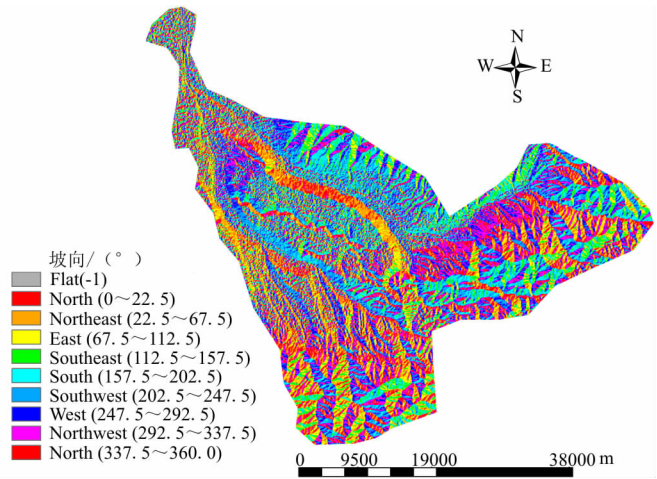


图 4 泸灞流域坡向

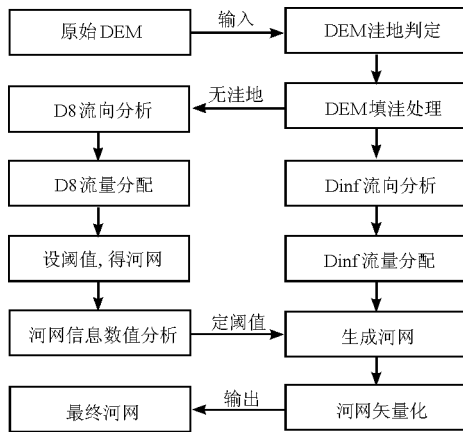


图 5 TauDEM 河网提取技术流程

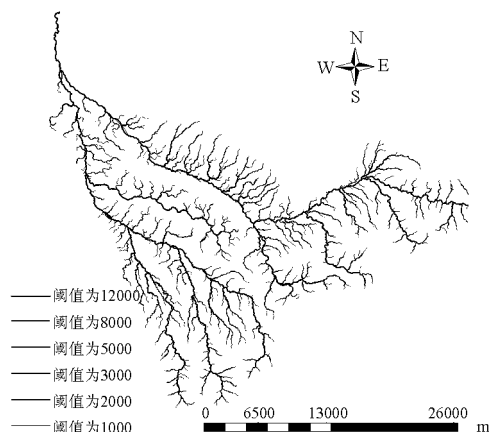


图 7 河网提取结果对比图

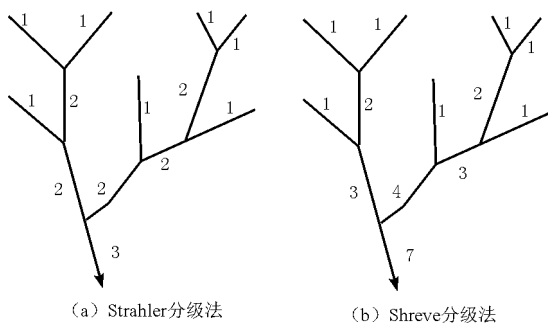


图 6 河流分级法示意图

3.3 Dinf 提取合适河网与分级

DEM 数据填洼处理后,利用 TauDEM 软件,输入填洼后的 DEM 数据,采用 Dinf 算法计算流向数据,对流量进行分配,然后以 8000 为河网阈值,得到栅格河网。将栅格河网进行矢量化得到基于 Dinf 算法提取的河网,使用 Strahler 分级法如图 10 所示。

表 1 流域河网特征随汇流阈值的变化

| 阈值 | 河流长度/km | 河网密度/($\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$) | 汇流面积/ km^2 | 河源数 |
|-------|----------|---|---------------------|-----|
| 1000 | 1281.035 | 0.787 | 36.497 | 912 |
| 2000 | 917.876 | 0.564 | 26.150 | 467 |
| 3000 | 746.348 | 0.459 | 21.263 | 325 |
| 4000 | 625.506 | 0.384 | 17.821 | 256 |
| 5000 | 559.796 | 0.344 | 15.949 | 193 |
| 6000 | 496.808 | 0.305 | 14.154 | 146 |
| 7000 | 452.528 | 0.282 | 13.063 | 115 |
| 8000 | 432.297 | 0.266 | 12.316 | 99 |
| 9000 | 403.358 | 0.248 | 11.492 | 85 |
| 10000 | 386.736 | 0.240 | 11.018 | 77 |
| 11000 | 371.592 | 0.228 | 10.587 | 69 |
| 12000 | 360.164 | 0.221 | 10.261 | 62 |

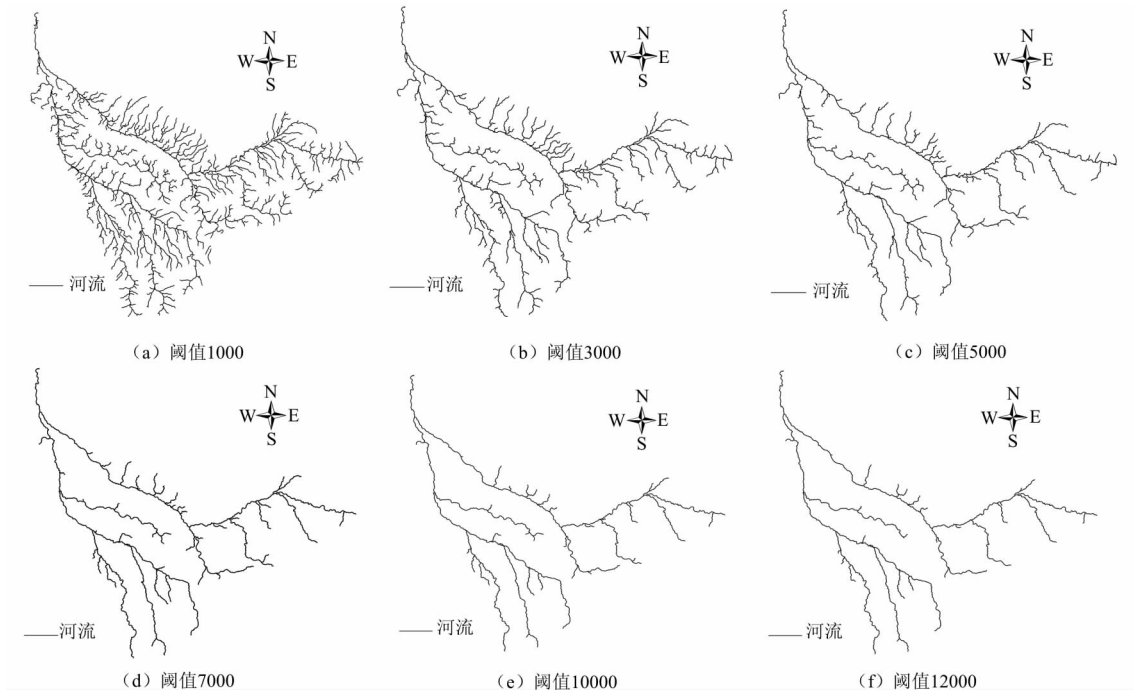


图8 不同阈值下提取的河网

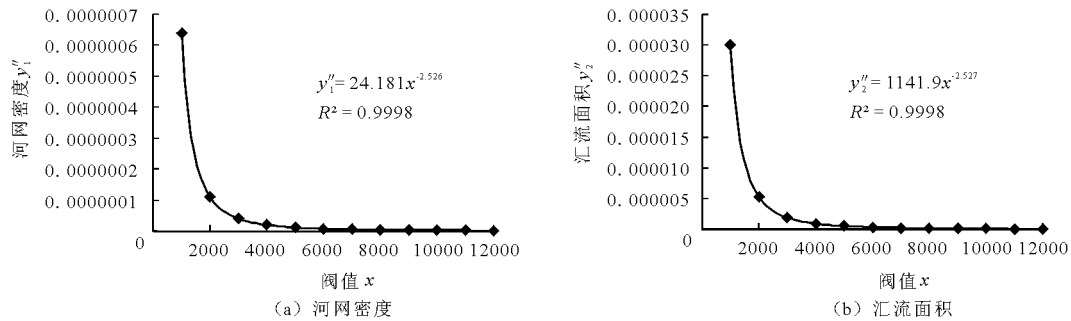


图9 二阶导数关系

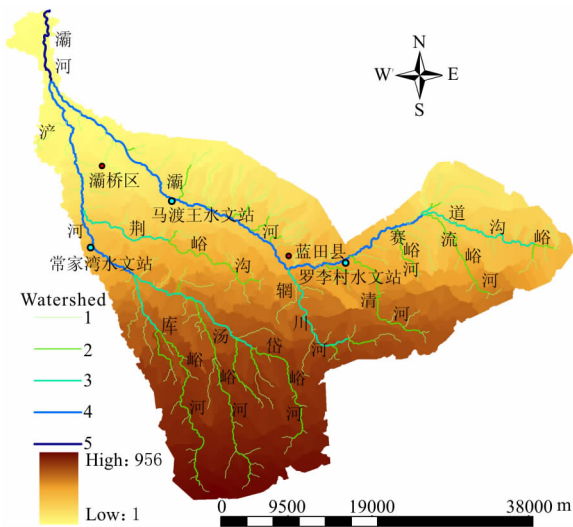


图10 TauDEM 提取的最佳河网及 Strahler 分级

从图10可以看出, 灞河主干河比较明显, 山区部分主要为1、2级河流, 丘陵区域主要为1、2、3、4级河流, 平原区主要为1、2、4级, 两河汇流后为5

级河流, 注入渭河。流域内共有99条河流, 其中1、2、3、4、5级河流总数分别为51、24、11、12、1条。提取的灞河流域数字河网与实际河网吻合度比较好, 尤其是主干河道, 差异主要存在于1、2级河流。对提取的最终河网进行分水岭, 其将大流域按照河网弧段分为若干个小的集水盆地, 对以后的流域水文模型建设中的子流域划分提供基础。

灞河流域主要支流包括荆峪沟、库峪河、汤峪河、岱峪河、辋川河、清河、道沟峪等, 河流总长度达447.84 km, 与本次数字水系提取结果432.297 km误差为3.5%; 大于12 km²的支流毛沟共96条, 与本次结果99条的误差为3.03%, 主要原因可能为DEM分辨率精度不够或软件对细节处理的欠缺, 但总体来说已经到达了想要的效果, 可以满足基本的水系管理与规划任务。对比西安市1:30万水系图(2014年修订)发现与灞河自然水系基本吻合, 图11为西安市1:30万水系图灞河流域临摹图。

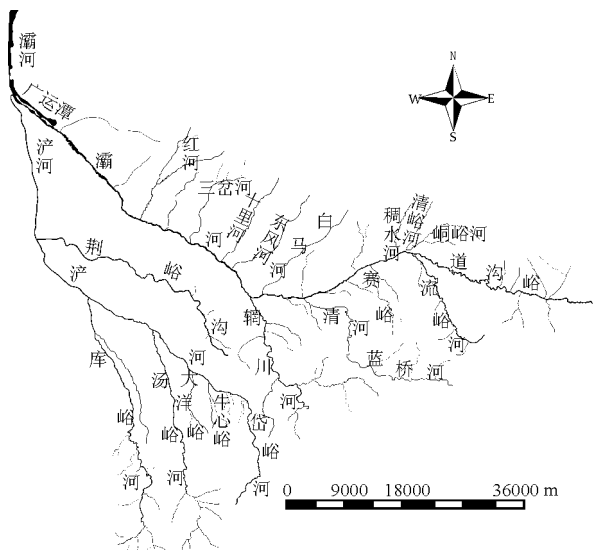


图 11 泾河流域 1:30 万水系图

4 结论与讨论

(1) 基于 DEM 数据与 ArcGIS 软件提取的河网与泾河自然水系基本吻合,可直接作为水文模型参数为泾河流域的生态环境治理提供数据理论支持,该方法大大提高了模型的效率,数据获取快、精度高且成本较低。

(2) 阈值的设定对河网的提取具有很大的影响。不同的阈值,提取的河网的形态和特征不同,阈值越小,河网越稠密,达到一定值后趋于平稳。本文利用阈值与河网密度、汇流面积的二阶导数关系确定了泾河流域最佳阈值为 8000。利用数理方法避免了以往手动调节阈值的主观性,提高了提取河网的客观性和精确性。

(3) 从宏观上来讲流域水文特征提取基本满足要求,但从对一些特殊地形(如平原地区的坡向、水系)的处理还难以满足要求,因此进一步优化程序是必要的。另外,DEM 精度的高低会直接影响流域特征提取的准确性,提高精度会对最后结果的精确度有很大帮助。

(4) 本文只结合运用了单流向算法和多流向算法的经典算法 - D8 和 Dinf 算法提取水系结果,还有其他先进方法如 Agree、Burn - in 等算法在后续的工作中需要继续研究。

参考文献:

[1] 王中根,刘昌明,左其亭,等. 基于 DEM 的分布式水文模型构建方法[J]. 地理科学进展, 2002, 21(5):430 - 439.
 [2] 徐宗学,程磊. 分布式水文模型研究与应用进展[J]. 水利学报, 2010, 41(9):1009 - 1017.
 [3] 陶艳成,华瑾,卢远,等. 基于 DEM 的钦江流域水文

特征提取研究[J]. 广西师范学院学报(自然科学版), 2012, 29(4):60 - 64 + 82.

- [4] 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, 5(1):56 - 59.
 [5] 宋向阳,吴发启,赵龙山,等. 基于 DEM 的延河流域水文特征提取与分析[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(4):200 - 206.
 [6] 杨华容,路军,彭文甫,等. 基于 DEM 和 GIS 的流域水文信息提取——以巴中市为例[J]. 人民长江, 2016, 47(8):34 - 38.
 [7] 蒋甜,陈端吕. 基于 DEM 的河网水系分形特征研究——以常德市桃源县为例[J]. 中国农学通报, 2013, 29(2):166 - 171.
 [8] 陈东风,巩伦宝,李振. 基于不同空间尺度 DEM 河网提取的阈值选取准则研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(2):109 - 113.
 [9] 梁启君,梁军,王少华,等. 分形在数字水系累计汇水量阈值确定中的应用研究[J]. 地理与地理信息科学, 2013, 29(1):111 - 112.
 [10] 张攀,孙维营. 基于 DEM 的细沟形态分维估算方法探讨[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(5):116 - 119.
 [11] 孙旭,宋孝玉. 西安市泾河流域水环境问题及治理措施[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(5):44 - 48.
 [12] 沈中原,李占斌,李鹏,等. 基于 DEM 的流域数字河网提取算法研究[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(1):20 - 23 + 28.
 [13] 王云,梁明,汪桂生. 基于 ArcGIS 的流域水文特征分析[J]. 西安科技大学学报, 2012, 32(5):581 - 585.
 [14] 张维,杨昕,汤国安,等. 基于 DEM 的平缓地区水系提取和流域分割的流向算法分析[J]. 测绘科学, 2012, 37(2):94 - 96.
 [15] Tarboton D G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models[J]. Water Resources Research, 1997, 33(2):309 - 320.
 [16] Lea N L. An aspect driven kinematic routing algorithm in [M]. Overland Flow: New York: Chapman & Hall, 1992.
 [17] Costa - Cabral M C, Burges S J. Digital Elevation Model Networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas[J]. Water Resources Research, 1994, 30(6):1681 - 1692.
 [18] 王峥,Nguyen Thi Tinh,马孝义,等. 基于 SRTM_DEM 的泾河流域特征信息提取研究[J]. 中国农村水利水电, 2011(11):32 - 36.
 [19] 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 + 171.
 [20] 常直杨,王建,白世彪,等. 均值变点分析法在最佳集水面积阈值确定中的应用[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2014, 37(1):147 - 150.