

基于多元回归的栅格水系阈值计算模型

张唯¹ 伍霞¹ 卢灿炯² 苏仁忠² 王玉着¹

(1. 中国地质大学(武汉)信息工程学院, 武汉 430074; 2. 湖北省农机安全监理总站, 武汉 430017)

摘要: 针对栅格水系提取中汇流累积量阈值对水系密度和质量的影响,以湖北省为研究样区,探索不同水流分配策略下,地形、降水量和植被因素与最佳水系阈值间的相关性,采用多元线性回归方法建立水系阈值计算模型。结果表明,最佳水系阈值与区域坡度、多年降水量以及植被覆盖率存在明显的正相关性,地势越陡峭、降水越充沛、植被越丰富,汇流累积量阈值越大。基于多元线性回归的栅格水系阈值提取模型能够有效融合不同区域的多源影响因素,得到合理的汇流累积量阈值。在不同水流分配策略下,方程的置信水平平均大于0.95,模拟的数字水系与实际水系具有较高的相似度,能够为农林规划和灾害预测等行业提供合理的水文信息。将该方法用于其他流域,同样可以取得较好的提取效果。

关键词: 汇流累积量; 水系提取; 多元线性回归; 多流向

中图分类号: P333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)10-0131-08

Determination of Flow Accumulation Threshold Based on Multiple Regression Model in Raster River Networks Extraction

Zhang Wei¹ Wu Xia¹ Lu Canjiong² Su Renzhong² Wang Yuzhuo¹

(1. Faculty of Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Hubei Agricultural Machinery Supervision Station, Wuhan 430017, China)

Abstract: Identifying the optimal flow accumulation threshold (threshold) based on digital elevation model (DEM) is a key process to define the drainage of a river basin. Due to lack of underlying surface information, it's common to establish a quantitative calculation model for threshold relying on the watershed topography and real river network. Except topography, however, vegetation, precipitation and other underlying surface factors were also correlated with the characteristics of river network. Furthermore, the extraction of river network based on grid DEM had two different flow direction allocation strategies, i. e., the single flow algorithm and multiple flow algorithm. Since the procedure of multiple flow algorithm was complicated, the present study mainly focused on selection of threshold under single flow algorithm and lack of the research of threshold determination of multiple flow algorithm. Aim at above problem, the climate and underlying surface conditions were considered to explore the relevance between influence factors (i. e., topography, vegetation and precipitation) and threshold, and a calculation model was put forward to compute threshold based on multiple linear regression model with different algorithms in Hubei Province. The results showed that the optimal thresholds had a positive correlation with local slope, average precipitation and vegetation coverage rate. The flow accumulation threshold was increased with the increase of terrain steepness, rainfall and vegetation coverage. The calculation model of flow accumulation threshold can effectively integrate multi-source influence factors in different regions and obtain reasonable threshold. The significance level of rejecting the null hypothesis were both lower than 0.05 in different flow direction allocation strategies and the coefficients of

收稿日期: 2016-03-09 修回日期: 2016-04-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41501584)

作者简介: 张唯(1980—),女,讲师,博士,主要从事数字地形分析研究,E-mail: zw_paper@163.com

determination (R^2) were higher than 0.9. Good results of extraction can also be got by applying this method to other river basin. It meant the result of simulated river network by calculation model of flow accumulation threshold had high similarity with the real river network, it also provided rational hydrological information for agroforestry planning, agricultural disaster prediction and other industrial applications.

Key words: flow accumulation; river network extraction; multiple linear regression; multiple flow algorithm

引言

水是人类赖以生存的重要资源,其形成和运动规律具有明显的地理特征。数字水文的兴起和格网数字高程模型(Digital elevation model, DEM)的广泛应用,极大地促进了基于流水物理模拟提取水文信息研究的发展,涌现了大量优秀的水系提取算法。其中,坡面径流模拟算法^[1]凭借其明确的物理意义和简洁的计算过程,成为目前最为成熟的DEM水系提取方式。

坡面径流模拟方法在设定不同水流分配策略的基础上,分析每个格网单元的水流方向和过境水量,采用汇流累积量来量化其汇水能力,进而提取汇流累积量超过一定阈值的网格单元作为流域的栅格河网。因此,汇流累积量阈值(也称水系阈值)作为决定流域水系规模的重要参数^[2],直接影响流域覆盖范围和调蓄能力的评估^[3],需要结合具体应用进行选择。

水系阈值的选择方法分为定性和定量两大类。定性的水系阈值选择主要采用试错法^[4-5],通过目视判别栅格河网与实际水系叠加后的吻合度来确定阈值,是目前水系阈值选择最常用的方法。定量的水系阈值选择需要根据合理的量化指标建立阈值计算模型,现有的量化指标主要从流域地形和真实水系中提取。流域地形指标包括平均坡降^[4,6]、地形维度^[3,7-8]以及高程均值^[9]等。真实水系指标则主要集中在水系密度^[10-11]和沟谷分叉比^[12]等方面。但水系的影响因素很多,除地形外,植被^[13]、降水等自然条件与水系特征间也存在一定的相关性^[14],可以用作阈值计算的量化指标。

栅格水系的提取需要经过数据预处理、水流方向计算、汇流累积量计算以及水系提取4个步骤。其中,水流方向存在单流向和多流向2种分配策略。单流向水流分配以D8算法^[1]为主,是当前主流GIS软件采用的水流计算方法,网格单元的水量全部流向周边坡降最大的网格。多流向方法则根据栅格的坡面特征来分配水流^[15],较为成熟的方法有MFD^[16]、TFM^[17]以及TFN^[18]等。不同的水流分配

策略下,栅格水系的分布形态会有所不同,在水系阈值的设置上也有一定差别^[19-20]。但由于多流向算法较为复杂,目前的研究主要集中在单流向分配策略下的水系阈值选择^[14],而缺乏针对多流向方法的水系阈值研究^[21]。

针对现有水系阈值选择研究中水系影响因素不全面,水流分配策略单一的问题,本文结合湖北省复杂的地形地貌特征,针对不同水流分配策略,分别探索水系阈值的影响因素及其相关性,并以此为基础,提出基于多元回归的栅格水系阈值计算模型,实现不同环境下栅格水系的自动提取。

1 基本理论与样区选择

1.1 影响因素

格网DEM提取的水系是自然降水作用下的潜在地表径流,其形态和水量与自然降水量、区域地形及周边植被覆盖等自然条件密切相关^[14,22](图1)。因此,本文利用降水、地形和地表覆被与阈值的间接影响,选择年降水量平均值、年降水量最大值、平均坡度、最大坡度和植被覆盖率5种定量指标,开展与汇流累积量阈值的相关性研究。

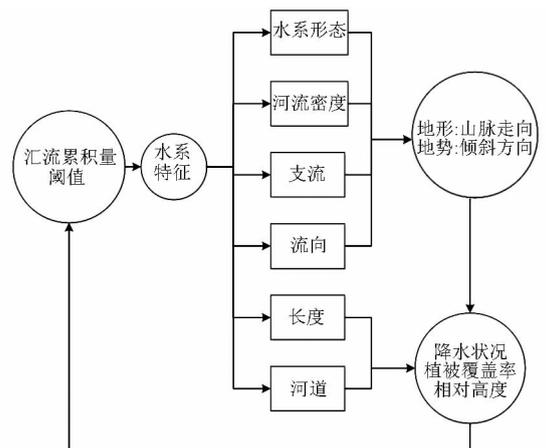


图1 阈值、水系和影响因素三者的关系

Fig. 1 Relationship of threshold, drainage network and influence factors

1.2 研究区概况

湖北省地貌类型丰富,西部山地分布较广,中部多平原,东部则被丘陵岗地环绕。长江水系由西向

东横贯全省,除长江和汉江支流外,各中低级河流纵横分布。湖北省属亚热带季风性湿润气候,年降水量分布不均匀,总体趋势为鄂西北较少,鄂东南较

多。由于山地、丘陵和平原等地形地貌的不同,植被分布的种类和数量也不同^[13]。图 2 为湖北省地形、降水量和地表覆被分布图。

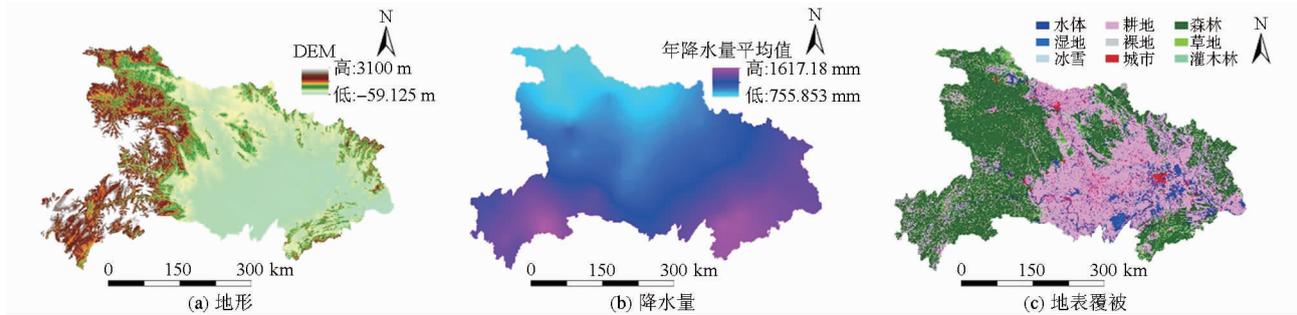


图 2 湖北省地形、降水量和地表覆被分布

Fig. 2 Distributions of terrain, precipitation and surface cover in Hubei Province

1.3 数据来源

(1)地形数据:采用中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://www.gscloud.cn>)提供的空间分辨率为 30 m 的 ASTER GDEM,作为获取水系和样本地形因子的数据。

(2)降水量数据:由武汉区域气候中心提供的 1975—2010 年之间的年降水量,得到流域的年降水量平均值和年降水量最大值作为地表降水的定量指标。

(3)地表覆被数据:采用全球 30 m 分辨率地表覆盖产品数据计算植被覆盖率并获得实际水系的分布。该数据覆盖南北纬 80° 的陆地范围,由

OPENLANDSERVICE 网站提供了 2010 基准年 GlobeLand30 产品的在线浏览和下载服务。

(4)水系数据:采用由中国气象局提供的湖北省 6 级水系数据作为判断最佳阈值的参考数据。

1.4 实验样区

针对现有水系提取算法在平原地区效果不佳的限制^[20],本次实验样本的选择主要考虑山地和丘陵地区,样区分布如图 3 所示。同时为充分体现地形、降水量和地表植被的影响,每个样区的植被覆盖率和降水量分布都维持在较高的水平。样本定量指标如表 1、2 所示。

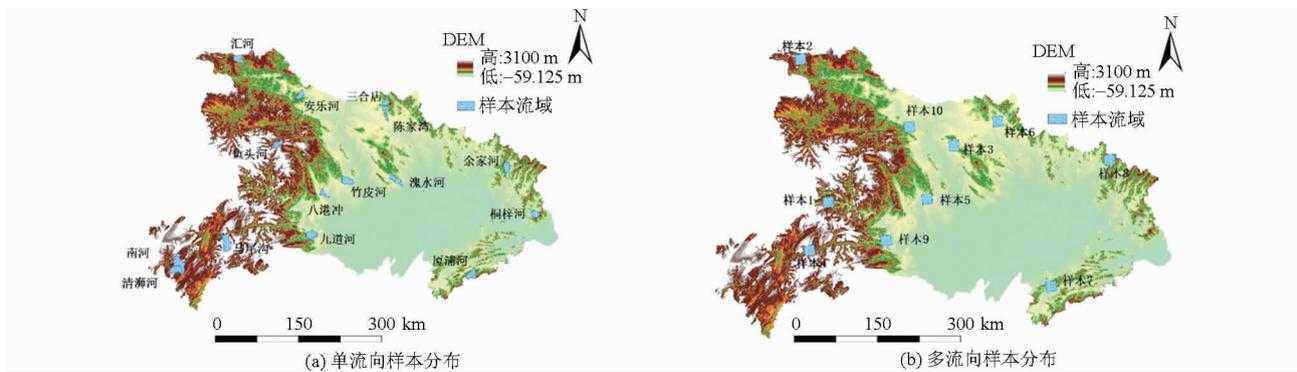


图 3 汇流累积量样区选择

Fig. 3 Selection of sampling zone for flow accumulation

2 研究方法

2.1 栅格水系提取方法

数字水系提取算法的主要思路是将水流量按一定的规则分配给每个格网,计算每个格网的汇流累积量,并选取大于某一汇流累积量阈值的栅格作为水系。根据单个网格水流分配策略的不同,算法分为单流向和多流向 2 类(图 4)。多流向算法相比单流向算法能较好地模拟水流在坡面上的散漫流动,且物理意义明确,更符合水流的实际特征^[19]。

2.2 最佳阈值的确定

分析流域最佳阈值与影响因素的关系,建立最佳阈值的选取模型,均需要初始确定样本流域的最佳阈值,本研究采用以下方法:

单流向算法以水系的长度误差作为评价标准,长度误差的计算式为

$$\hat{l} = \frac{|L_i - L|}{L} \times 100\% \quad (0 \leq \hat{l} \leq 100\%) \quad (1)$$

式中 \hat{l} ——长度相对误差

L ——实际水系的总长度, m

L_i ——第 i 个流域提取水系的总长度, m

表 3 列举了 15 个流域样本的实际长度以及提取水系的长度, 平均长度相对误差为 0.053%。

表 1 单流向算法流域样本的主要特征

Tab.1 Main characteristics of samples for single flow algorithm

| 流域名称 | 面积/ km ² | 最大 坡度/ (°) | 平均 坡度/ (°) | 植被 覆盖 率 | 年降水量 最大值/ mm | 年降水量 平均值/ mm |
|------|------------------------|------------------|------------------|---------------|--------------------|--------------------|
| 陈家湾 | 120.986 | 31.09 | 5.54 | 0.958 | 929.847 | 891.79 |
| 竹皮河 | 230.931 | 57.22 | 6.80 | 0.853 | 958.752 | 935.80 |
| 安乐河 | 133.281 | 52.41 | 15.36 | 0.948 | 828.310 | 804.48 |
| 九道河 | 229.923 | 61.37 | 14.00 | 0.948 | 1184.360 | 1164.11 |
| 厦浦河 | 206.793 | 67.98 | 27.62 | 0.999 | 1504.930 | 1499.06 |
| 南河 | 336.029 | 75.92 | 26.74 | 0.985 | 1431.950 | 1390.67 |
| 桐梓河 | 158.106 | 63.19 | 15.94 | 0.997 | 1370.970 | 1367.31 |
| 鱼头河 | 151.445 | 72.03 | 25.55 | 0.991 | 983.120 | 951.04 |
| 汇河 | 196.964 | 70.49 | 25.46 | 0.988 | 1621.130 | 1138.65 |
| 清澗河 | 242.685 | 77.00 | 26.93 | 1.000 | 1428.601 | 1408.37 |
| 马尾沟 | 372.418 | 80.00 | 23.41 | 0.987 | 1490.480 | 1417.29 |
| 洩水河 | 176.535 | 48.73 | 6.40 | 0.923 | 1085.210 | 1058.98 |
| 八港冲 | 83.908 | 58.86 | 9.66 | 0.863 | 1012.560 | 980.34 |
| 三合店 | 103.168 | 59.34 | 15.58 | 0.953 | 896.440 | 883.72 |
| 余家河 | 186.345 | 63.06 | 19.55 | 0.994 | 1304.270 | 1284.23 |

表 2 多流向算法流域样本的主要特征

Tab.2 Main characteristics of samples for multiple flow algorithm

| 流域 样本 | 最大 坡度/ (°) | 平均 坡度/ (°) | 植被 覆盖率 | 年降水量 最大值/ mm | 年降水量 平均值/ mm |
|----------|------------------|------------------|-----------|--------------------|--------------------|
| 样本 1 | 73.21 | 3.21 | 0.922 | 1071.690 | 1050.37 |
| 样本 2 | 69.94 | 3.33 | 0.973 | 1621.130 | 1138.93 |
| 样本 3 | 43.71 | 2.11 | 0.952 | 915.988 | 893.90 |
| 样本 4 | 79.75 | 3.13 | 0.956 | 1381.780 | 1358.03 |
| 样本 5 | 30.29 | 1.65 | 0.738 | 996.755 | 963.78 |
| 样本 6 | 50.71 | 2.38 | 0.944 | 974.692 | 960.83 |
| 样本 7 | 64.17 | 2.67 | 0.919 | 1544.630 | 1632.48 |
| 样本 8 | 59.36 | 2.83 | 0.979 | 1263.340 | 1245.07 |
| 样本 9 | 64.91 | 2.60 | 0.903 | 1296.590 | 1224.39 |
| 样本 10 | 59.47 | 7.86 | 0.894 | 879.260 | 867.43 |

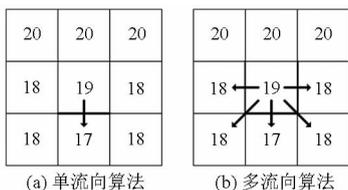


图 4 不同水流分配策略

Fig.4 Allocation strategies of different flow algorithms

多数情况下, 基于多流向算法提取数字水系, 得到的是栅格水系数据, 对水系提取的精度评价采用定性的方法^[21]。本研究以实际栅格水系的像元数

量与提取水系的像元数量的误差为判断依据, 进而确定流域的最佳阈值。像元数量相对误差计算式为

$$\hat{p} = \frac{|P_i - P|}{P} \times 100\% \quad (0 \leq \hat{p} \leq 100\%) \quad (2)$$

式中 \hat{p} ——像元数量相对误差

P_i ——第 i 个流域提取水系的像元数量

P ——实际水系的像元数量

表 4 列出了多流向算法最佳阈值的确定过程, 得到平均像元数量相对误差为 4.3%。

表 3 单流向算法最佳阈值确定过程

Tab.3 Determination process of optimal threshold for single flow algorithm

| 流域名称 | 实际水系 长度/m | 提取水系 长度/m | 水系长度 相对误差/% | 最佳阈值 (栅格数) |
|------|--------------|--------------|----------------|---------------|
| 陈家湾 | 76109.34 | 76068.71 | 0.053 | 880 |
| 竹皮河 | 76234.71 | 76305.99 | 0.094 | 4530 |
| 安乐河 | 48358.80 | 48372.22 | 0.028 | 7670 |
| 九道河 | 47958.32 | 47916.98 | 0.086 | 8225 |
| 厦浦河 | 67603.74 | 67557.50 | 0.068 | 10350 |
| 南河 | 66224.23 | 66166.72 | 0.087 | 10800 |
| 桐梓河 | 61486.54 | 61504.61 | 0.029 | 12750 |
| 鱼头河 | 27143.66 | 27153.36 | 0.036 | 14850 |
| 汇河 | 65647.06 | 65588.73 | 0.089 | 19980 |
| 清澗河 | 77107.82 | 77118.94 | 0.014 | 21750 |
| 马尾沟 | 51040.86 | 51025.53 | 0.030 | 13250 |
| 洩水河 | 150133.36 | 150019.48 | 0.076 | 1335 |
| 八港冲 | 11683.78 | 11681.98 | 0.015 | 5280 |
| 三合店 | 26514.52 | 26499.78 | 0.056 | 7625 |
| 余家河 | 33455.22 | 33468.78 | 0.041 | 13083 |

表 4 多流向算法最佳阈值确定过程

Tab.4 Determination process of optimal threshold for multiple flow algorithm

| 流域 样本 | 实际像元 数量/个 | 提取像元 数量/个 | 像元数量 相对误差/% | 最佳阈值 (栅格数) |
|----------|--------------|--------------|----------------|---------------|
| 样本 1 | 16384 | 14916 | 9.0 | 5.0 |
| 样本 2 | 4582 | 4426 | 3.4 | 8.0 |
| 样本 3 | 11937 | 11536 | 3.4 | 3.0 |
| 样本 4 | 9830 | 9900 | 0.7 | 7.5 |
| 样本 5 | 77883 | 74191 | 4.7 | 0.5 |
| 样本 6 | 16912 | 17149 | 1.4 | 4.0 |
| 样本 7 | 12041 | 11796 | 2.0 | 6.0 |
| 样本 8 | 6325 | 5925 | 6.3 | 6.1 |
| 样本 9 | 25597 | 23706 | 7.4 | 3.1 |
| 样本 10 | 19929 | 20851 | 4.6 | 5.8 |

2.3 结果与分析

2.3.1 地表降水对汇流累积量阈值的影响

降水是地表潜在水流形成的直接原因, 降水量对地表漫流的形态有较大影响, 进而影响提取地表径流时汇流累积量阈值的确定。

(1)单流向算法

图 5 是地表降水与汇流累积量阈值的函数曲线关系,两者相关性的决定系数 R^2 说明年降水量平均值对阈值的影响程度略高于年降水量最大值。整体趋势是地表降水量大的流域,阈值选取相对大;地表降水量小的流域,阈值选取相对小。通常,山区降水较平原丰富,而河流上中游从山区通过,侵蚀作用导

致河床下蚀,水流速度快,河流宽度较窄,阈值设置较大;下游多位于平原区域,流速缓慢,河谷加宽,阈值设置较小。

(2)多流向算法

图 6 显示多流向算法的阈值同样与降水量相关,且年降水量最大值与阈值的的关系更密切,整体趋势仍是阈值随地表降水量的增大而增大。

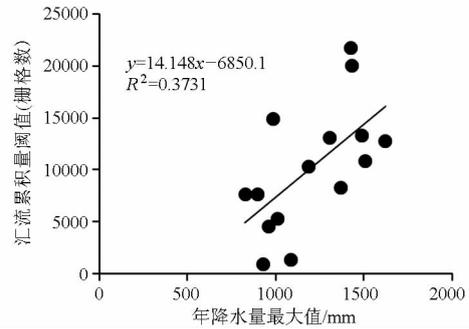
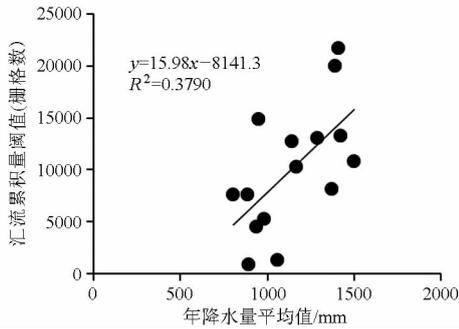


图 5 单流向算法地表降水量与阈值的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of surface precipitation and threshold for single flow algorithm

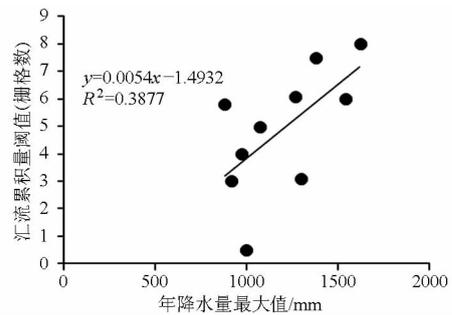
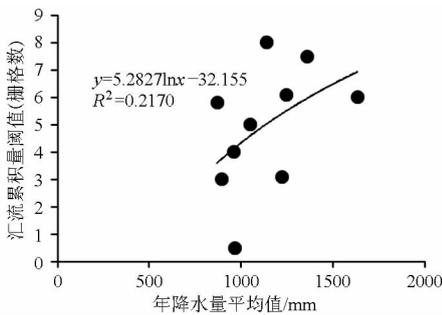


图 6 多流向算法地表降水量与阈值的相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of surface precipitation and threshold for multiple flow algorithm

2.3.2 地形因子对汇流累积量阈值的影响

地表漫流的方向主要取决于周边地形的坡度,但由于栅格地形条件下,坡度是典型的点位参数,不具有物理意义,因此在分析时,通常采用区域地形坡度的统计量作为分析的量化指标。本研究采用最大坡度和平均坡度分析地形因子对汇流累积量阈值的影响。

(1)单流向算法

图 7 中平均坡度和最大坡度均与阈值高度相关,整体表现为阈值随地形因子的增大而增大。位于河流水系的上游(包括河源),多为山区,由大大

小小的支流组成,地形陡峭,坡度大,水流湍急,如长江上游(宜昌以上河段)。这一上游河流汇集区,水流具有极大的位能,以垂直向下侵蚀作用为主,河谷较窄,因此阈值设置得较大。中游河段多为丘陵地区,由于支流不断注入,水量丰富,但河床纵坡平缓、流速缓慢,河流的侧向侵蚀作用显著,河谷不断展宽,因此阈值设置得相比山区较小。下游河段多为平原,多数支流在干流区以上已经汇集于主河道,河流以侧向侵蚀和沉积作用为主,河谷断面形态为箱型或具有宽阔的冲积平原,因此阈值设置得小,才能

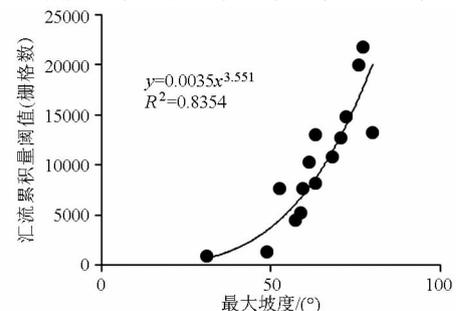
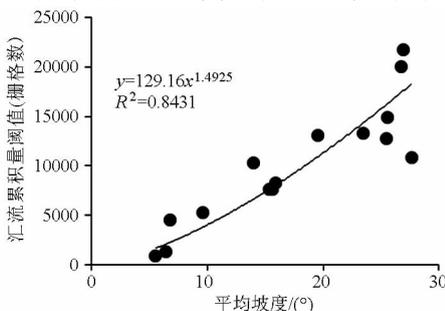


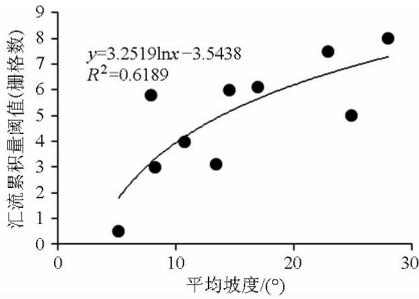
图 7 单流向算法地形因子与阈值的相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis of terrain and threshold for single flow algorithm

反映平原区域的水系形态。

(2)多流向算法

多流向算法同样受地形的影响,不仅可以提取较大面积积水区域,而且山区丘陵地区提取的水系



效果更好。图8反映了阈值与地形因子的相关关系,与单流向算法相同,阈值随地形因子的增加而增大。但是单流向算法中平均坡度与阈值高度相关,多流向算法中最大坡度与阈值高度相关。

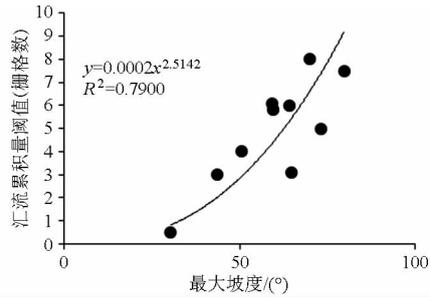


图8 多流向算法地形因子与阈值的相关性分析

Fig. 8 Correlation analysis of terrain and threshold value for multiple flow algorithm

2.3.3 地表覆被与汇流累积量阈值

植被是陆地水文循环的各个重要过程的参与者,对降水、蒸散和径流等水文通量在空间上的分布特征有着重要的影响。

(1)单流向算法

植被把降水量分为林冠截留量、茎叶流量和透过量。三者的比例随林种、林木分布密度的不同而不同,而茎叶流量的增加能促进植物的保水持水,不利于干流的形成。森林植被能在降水充沛的季节增

加入渗,从而增加地下水的补充量,形成地下径流。因此高植被覆盖率的流域出现高阈值现象(图9a),但是植被覆盖率与阈值低度相关,原因在于平原区域的流域,受人为因素的影响,且城镇分布较广,植被覆盖率较低。

(2)多流向算法

图9b中植被覆盖率与阈值高度相关。相比单流向算法,植被覆盖率对多流向算法的贡献更大。进一步表明植被可以作为选择最佳阈值的代表性变量。

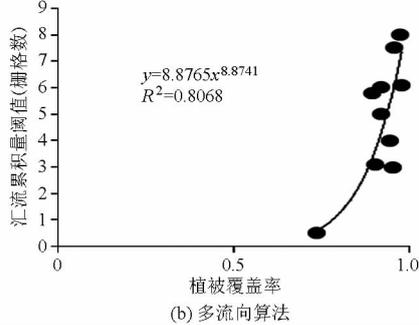
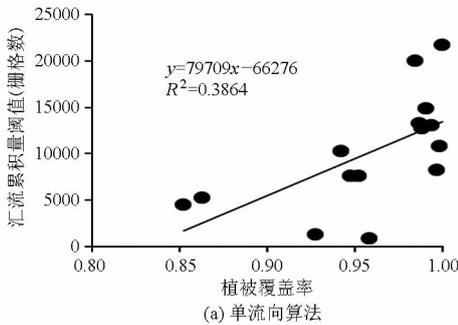


图9 地表植被与阈值的相关性分析

Fig. 9 Correlation analysis of surface vegetation and threshold

2.3.4 水系阈值提取模型

2.3.1~2.3.3节分析显示,各要素与阈值有较好的相关性,同一流域中地形、降水量和植被对阈值的作用力各不同,存在定量指标权重不一的情况。因此,对于这样的流域需要分析多个要素对阈值的共同影响机制。

(1)单流向算法

将年降水量平均值、平均坡度和植被覆盖率作为自变量,每个子流域的最佳阈值作为因变量,先求对数再进行多元线性回归,得到方程

$$\ln Y = 0.308 \ln X_1 + 1.934 \ln X_2 - 7.663 \ln X_3 + 1.155$$

(3)

式中 Y——流域最佳汇流累积量阈值
X₁——流域年降水量平均值,mm

X₂——流域的平均坡度,(°)

X₃——植被覆盖率

表5为单流向算法多元回归方程的评价表。从表中可得,该方程的自变量可以解释92.3%的因变量。自变量的系数均为正,与阈值呈正相关,这一结论同单个变量与阈值的关系相同,且符合熊立华等^[6]证明的流域平均坡降与阈值的反函数关系。方程的置信水平大于0.95,说明该回归方程通过了显著检验。参数显著性检验中,平均坡度和植被覆盖率与阈值的线性关系较高,只有年降水量平均值的置信水平低于0.95。整体来看,多要素的决定系数大于单要素的决定系数,且方程通过显著性检验,说明多要素对阈值的共同影响更为显著。

表 5 单流向算法回归方程评价

Tab. 5 Regression equation evaluation of single flow algorithm

| 因变量 | R^2 | 方程显著性检验 |
|-------|--------------------|--------------------|
| Y | 0.923 | 2×10^{-6} |
| 自变量 | 参数显著性检验 | |
| X_1 | 0.529 | |
| X_2 | 2×10^{-6} | |
| X_3 | 0.006 | |

(2) 多流向算法

最佳阈值与年降水量最大值、最大坡度以及植被覆盖率的相关性较高,以这 3 个定量指标作为自变量,每个流域的最佳阈值作为因变量,先求对数再进行多元线性回归,得到回归方程

$$\ln y = -0.142 \ln x_1 + 1.492 \ln x_2 + 5.246 \ln x_3 - 3.184 \quad (4)$$

式中 y ——流域最佳汇流累积量阈值

x_1 ——流域年降水量最大值, mm

x_2 ——流域最大坡度, ($^\circ$)

x_3 ——流域植被覆盖率

表 6 为多流向算法多元回归方程的评价。该回归方程的决定系数为 0.928,置信水平大于 0.95,说明方程可靠度高。参数显著性检验表明植被覆盖率和最大坡度与最佳阈值的关系更紧密。因此,由地形、降水量和植被的不断更替,阈值也随之改变,说明气候和下垫面条件复杂的流域,需要利用不同的流域特征,选取流域最佳的汇流累积量阈值,该结论与孙爱立等^[14]的结论一致。

表 6 多流向算法回归方程评价

Tab. 6 Regression equation evaluation of multiple flow algorithm

| 因变量 | R^2 | 方程显著性检验 |
|-------|---------|-----------------------|
| y | 0.928 | 7.91×10^{-4} |
| 自变量 | 参数显著性检验 | |
| x_1 | 0.784 | |
| x_2 | 0.027 | |
| x_3 | 0.016 | |

2.3.5 精度评价

为进一步验证该回归方程的可靠性,针对单流向算法和多流向算法,选取 2 个样本代入回归方程进行验证。

(1) 单流向算法

单流向算法选取的邹家河流域为丘陵地貌,植被稠密,降水较多;天池河流域,平均坡度为 31.37° ,位于山地区域,植被覆盖率高,降水相比邹

家河流域丰富。图 10 和表 7 分别从定性和定量的角度证明回归方程计算出的阈值提取的水系与实际水系的吻合度较高。

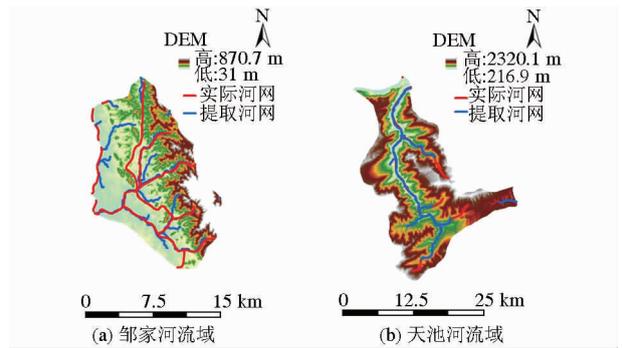


图 10 单流向检验结果

Fig. 10 Test result of single flow algorithm

表 7 回归方程在其他流域中的应用

Tab. 7 Application of regression equation in other basins

| 实验区域 | 实际水系 长度/m | 提取水系 长度/m | 回归方程计算的 长度相对 阈值(栅格数) | 误差/% |
|-------|--------------|--------------|----------------------------|------|
| 邹家河流域 | 72 867.50 | 77 258.24 | 4 307.65 | 6.03 |
| 天池河流域 | 72 099.02 | 66 877.58 | 25 435.07 | 7.24 |

(2) 多流向算法

多流向采取同样的方式,选取其他样本进行检验。图 11 为 2 个样本区域提取水系和实际水系对比的示意图,从定性的角度分析,回归方程计算的阈值提取的水系与实际水系吻合程度很高,说明回归方程所计算的阈值可以应用于实际中。表 8 给出回归方程在这 2 个样本中的应用,从定量的角度来看,提取水系的像元数量与实际水系的像元数量比较接近。因此,在已知各种影响因素的条件下,应用回归方程计算汇流累积量阈值方便且与真实水系吻合程度高。

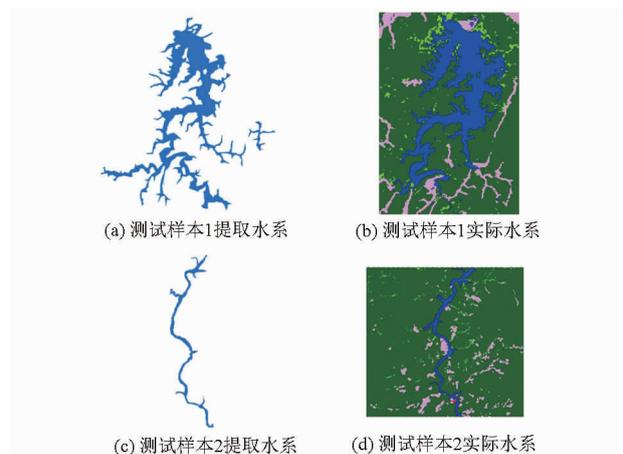


图 11 多流向检验结果

Fig. 11 Test result of multiple flow algorithm

表8 回归方程在其他样本中的应用

Tab. 8 Application of regression equation in other basin samples

| 样本流域 | 实际水系 像元数量/个 | 提取水系 像元数量/个 | 回归方程计算的 阈值(栅格数) | 像元数量 相对误差/% |
|------|----------------|----------------|--------------------|----------------|
| 1 | 10 105 | 10 199 | 4.33 | 0.93 |
| 2 | 8 786 | 9 674 | 7.23 | 10.1 |

3 结论

(1)通过对阈值影响因素的分析发现,不同水流分配策略下,水系提取的阈值与地形、地表覆被以及地表降水量具有明显的正相关性。湖北省年降水量分布不均匀,山区多,平原河谷少。由于地势越陡峭,相对高差越大,水流下蚀作用越强,河流宽度变窄,汇流累积量阈值应适当增大;相反,地势平坦区域,河谷加宽,水流速度减缓,水量增加,流域面积增大,汇流累积量阈值设置则需要减小。此外,植被的

存在不仅可以提高渗透能力,而且加强土壤的持水能力,从而减少地表径流的形成。因此,流域地势越陡峭,降水越丰富,植被覆盖率越大,汇流累积量阈值设置得越大。

(2)基于多元回归的栅格水系计算模型在不同水流分配策略下均通过了显著性检验,且决定系数很高。将回归方程代入其他流域进行验证,无论定性还是定量分析,结果均证明回归方程有较好的适用性。

(3)栅格水系提取主要获取的是地表潜在水流,在不同环境下,与真实水流仍然存在一定差异。因此,提取地表潜在水流的最佳阈值设定,还应该根据特定的流域面积、当前的地理环境、降水特征以及周边土壤、植被等因素进行综合考虑。在后续研究中,将对此开展相应的进一步分析研究,以期获得更好的提取效果。

参 考 文 献

- O'CALLAGHAN J F, MARK D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data [J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1984, 28(3):323-344.
- ARNOLD Neil. A new approach for dealing with depressions in digital elevation models when calculating flow accumulation values [J]. *Progress in Physical Geography*, 2010, 34(6):781-809.
- 李丽. 分布式水文模型的汇流演算研究[D]. 南京:河海大学,2007.
LI Li. Study on flood routing of distributed hydrologic models [D]. Nanjing: Hohai University,2007. (in Chinese)
- 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.
YANG Bang, Ren Liliang. Identification and comparison of critical support area in extracting drainage network from DEM [J]. *Water Resources and Power*,2009,27(5):11-14,171. (in Chinese)
- JOAQUIN Camara, MIGUEL Angel Martin, VICENTE Gomez-Miguel. Quantifying the relationship between drainage networks at hillslope scale and particle size distribution at pedon scale [J]. *Fractals*, 2015, 23(1):154007.
- 熊立华,郭生练. 基于 DEM 的数字水系生成方法的探讨[J]. *长江科学院院报*,2003,20(4):14-17.
XIONG Lihua, GUO Shenglian. Method for extracting digital channel network from digital elevation model of watershed [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*,2003,20(4):14-17. (in Chinese)
- 陈东风,巩伦宝,李振. 基于不同空间尺度 DEM 水系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.
CHEN Dongfeng, GONG Lumbao, LI Zhen. Study on principle of threshold selection of river network extraction based on different DEM scales [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*,2015,26(2):109-113. (in Chinese)
- 原晓平,刘少峰,田贵中,等. 基于 DEM 的格尔木河流域水系分维分析[J]. *国土资源遥感*,2013,25(1):111-116.
YUAN Xiaoping, LIU Shaofeng, TIAN Guizhong, et al. Analysis of the fractal dimension in the Golmud River Basin based on DEM [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*,2013,25(1):111-116. (in Chinese)
- LUO Mingliang, TANG Guoan, DONG Youfu. Uncertainty of flow accumulation threshold influence in hydrology modeling—a case study in Qinling mountain SRTM3 DEM based [C] // *Proceedings of 2008 International Workshop on Education Technology and Training & 2008 International Workshop on Geoscience and Remote Sensing*,2008:1052-1055.
- 孔凡哲,李莉莉. 利用 DEM 提取水系时集水面积阈值的确定[J]. *水电能源科学*,2005,23(4):65-67.
KONG Fanzhe, LI Lili. Determination of river drainage area threshold for extraction of drainage network by DEM [J]. *Water Resources and Power*,2005,23(4):65-67. (in Chinese)
- 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.
CHANG Zhiyang, WANG Jian, BAI Shibiao, et al. Determination of accumulation area based on the method of applying mean of change-point analysis [J]. *Journal of Nanjing Normal University: Natural Science Edition*,2014,37(1):147-150. (in Chinese)

- 16 王辉, 王全九, 邵明安. 前期土壤含水量对坡面产流产沙特性影响的模拟试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 65-68.
WANG Hui, WANG Quanjiu, SHAO Ming'an. Simulation experiment of effect of antecedent soil moisture content on characteristics of runoff and sediment from two soil sloping lands [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(5): 65-68. (in Chinese)
- 17 李桂芳, 郑粉莉, 卢嘉, 等. 降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 147-154, 182.
LI Guifang, ZHENG Fenli, LU Jia, et al. Effects of rainfall and topography on soil erosion processes of black soil hillslope [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 147-154, 182. (in Chinese)
- 18 LIU Q J, AN J, WANG L Z, et al. Influence of ridge height, row grade, and field slope on soil erosion in contour ridging systems under seepage conditions[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 147: 50-59.
- 19 ARJMAND SAJJADI S, MAHMOODABADI M. Aggregate breakdown and surface seal development influenced by rain intensity, slope gradient and soil particle size [J]. Solid Earth, 2015, 6(1): 311-321.
- 20 安娟, 卢嘉, 郑粉莉, 等. 不同地表条件下黑土区坡耕地侵蚀过程中土壤团聚体迁移 [J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 100-104.
AN Juan, LU Jia, ZHENG Fenli, et al. Soil aggregate transport during soil erosion process under different soil surface conditions on black soil slope farmland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(6): 100-104. (in Chinese)
- 21 黄满湘, 章申, 晏维金. 农田暴雨径流侵蚀泥沙对氮磷的富集机理[J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 306-310.
HUANG Manxiang, ZHANG Shen, YAN Weijin. Sediment enrichment mechanism of nitrogen and phosphorus under simulated rainfall conditions [J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(2): 306-310. (in Chinese)
- 22 樊红柱, 张建辉, 王勇, 等. 川北山区坡耕地侵蚀耕作对土壤团聚体碳的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 157-164.
FAN Hongzhu, ZHANG Jianhui, WANG Yong, et al. Tillage erosion impacts on soil aggregate associated carbon in mountainous region slope farmland of northern Sichuan [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 157-164. (in Chinese)
- 23 WAIRIU M, LAL R. Soil organic carbon in relation to cultivation and top soil removal on sloping lands of Kolombangara, Solomon Islands [J]. Soil and Tillage Research, 2003, 70: 19-27.
- 24 MAMEDOV A I, SHAINBERG I, LEVY G J. Wetting rate and sodicity effects on interrill erosion from semi-arid Israeli soils [J]. Soil and Tillage Research, 2002, 68: 121-132.

(上接第 138 页)

- 12 李精忠, 艾廷华, 柯舒. DEM 提取谷地线的有效汇水量阈值范围[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2012, 37(10): 1244-1247.
LI Jingzhong, AI Tinghua, KE Shu. Effective flow accumulation threshold of extracting valley-line from grid-based digital elevation model [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(10): 1244-1247. (in Chinese)
- 13 王映明. 湖北植被地理分布的规律性(上)[J]. 植物科学学报, 1995, 13(1): 47-54.
- 14 孙爱立, 余钟波, 杨传国, 等. 我国水系提取阈值影响因素分析[J]. 水利学报, 2013, 44(8): 901-908.
SUN Aili, YU Zhongbo, YANG Chuanguo, et al. Impact factors of contribution area threshold in extracting drainage network for rivers in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(8): 901-908. (in Chinese)
- 15 RUEDA Antonio, NOGUERA Jose M, MARTINEZ-CRUZ Carmen. A flooding algorithm for extracting drainage networks from unprocessed digital elevation models [J]. Computers and Geosciences, 2013, 59(10): 116-123.
- 16 WOLOCK David M, MCCABE Gregory J. Comparison of single and multiple flow direction algorithms for computing topographic parameters in TOPMODEL [J]. Water Resources Research, 1995, 31(5): 1315-1324.
- 17 PETTER Pilesjö, ABDULGHANI Hasan. A triangular form-based multiple flow algorithm to estimate overland flow distribution and accumulation on a digital elevation model [J]. Transactions in GIS, 2014, 18(1): 108-124.
- 18 ZHOU Qiming, PETTER Pilesjö, CHEN Yumin. Estimating surface flow paths on a digital elevation model using a triangular facet network [J]. Water Resources Research, 2011, 47(7): W07522.
- 19 秦承志, 李宝林, 朱阿兴, 等. 水流分配策略随下坡坡度变化的多流向算法[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 450-455.
QIN Chengzhi, LI Baolin, ZHU Axing, et al. Multiple flow direction algorithm with flow partition scheme based on downslope gradient [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(4): 450-455. (in Chinese)
- 20 秦承志, 朱阿兴, 李宝林, 等. 基于栅格 DEM 的多流向算法述评[J]. 地学前缘, 2006, 13(3): 91-98.
QIN Chengzhi, ZHU Axing, LI Baolin, et al. Review of multiple flow direction algorithms based on gridded digital elevation models [J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(3): 91-98. (in Chinese)
- 21 邬伦, 汪大明, 张毅. 基于 DEM 的水流方向算法研究[J]. 中国图象图形学, 2006, 11(7): 998-1003.
WU Lun, WANG Daming, ZHANG Yi. Research on the algorithms of the flow direction determination in ditches extraction based on grid DEM [J]. Journal of Image and Graphics, 2006, 11(7): 998-1003. (in Chinese)
- 22 邢贞相, 闫丹丹, 刘美鑫, 等. 三江平原近 60 年降水量时空变异特征分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 337-344.
XING Zhenxiang, YAN Dandan, LIU Meixin, et al. Spatiotemporal variability analysis of annual precipitation in Sanjiang plain in recent sixty years [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 337-344. (in Chinese)