

# 基于轮廓不同的 DEM 对宁波市姚江 流域平原河网的提取研究

李天昊<sup>1,2</sup>, 王侃<sup>2</sup>, 程军蕊<sup>2</sup>, 杨雪玲<sup>2</sup>, 张招招<sup>1,2</sup>, 韩世豪<sup>1,2</sup>

(1. 宁波大学 地理与空间信息技术系, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波大学 生态环境研究所, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** [目的] 针对目前基于 DEM 提取平原河网所遇到的困境, 采用新的视角提取平原河网, 为完善水系自动化提取方法研究提供依据。[方法] 采用 Acr Hydro Tools 和 SWAT 工具在轮廓不同的 DEM 下, 对宁波姚江流域进行河网提取和流域确定。再以提取后的流域总面积与河流总长度为定量分析的主要指标, 用相对误差公式、河网套合差公式和 Visual Similarity Duplicate Image Finder 软件进行综合评价与误差分析。[结果] 在真实河网辅助下, Acr Hydro Tools 与 SWAT 均是在规整型 DEM 基础上的提取效果很差。在临近型 DEM 上所提取的河网、流域和流域总出口与实际相符且精度、相似度都很高。[结论] 用 Acr Hydro Tools 和 SWAT 两种工具提取流域水系都是可取的, 但 SWAT 更加便捷; 不同轮廓的 DEM 以及其是否与流域总出口相切合会极大地影响河网提取的质量。

**关键词:** DEM; 平原河网; Acr Hydro Tools; SWAT

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2017)04-0166-06

中图分类号: P334

**文献参数:** 李天昊, 王侃, 程军蕊, 等. 基于轮廓不同的 DEM 对宁波市姚江流域平原河网的提取研究[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 166-171. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.028; Li Tianhao, Wang Kan, Cheng Junrui, et al. Extraction study of plain river network in Yaojiang river basin of Ningbo City based on DEM of different contour[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(4): 166-171. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.028

## Extraction Study of Plain River Network in Yaojiang River Basin of Ningbo City Based on DEM of Different Contour

LI Tianhao<sup>1,2</sup>, WANG Kan<sup>2</sup>, CHENG Junrui<sup>2</sup>, YANG Xuelling<sup>2</sup>, ZHANG Zhaozhao<sup>1,2</sup>, HAN Shihao<sup>1,2</sup>

(1. Department of Geography & Spatial Information Techniques, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China; 2. Institute of Eco-environmental Science, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

**Abstract:** [Objective] Concerning the shortage in the extraction of plain river network based on DEM, we adopted a new method to extract plain river network and to provide basis for automatic drainage extraction method. [Methods] Using Acr Hydro Tools and SWAT, the river network of Yaojiang river basin in Ningbo City was extracted in DEMs with different contour. The extracted total area of the basin and total length of rivers were used as the main index of quantitative analysis. Relative error formula, matching error formula of river network and Visual Similarity Duplicate Image Finder software were used for comprehensive evaluation and error analysis. [Results] With the help of the real river network, the extracted results based on Neat DEM by Acr Hydro Tools and SWAT were very bad. However, the extracted river network, basin and total basin export based on Adjacent DEM were consistent with the actual, and the precision and similarity were also high. [Conclusion] Extracting basin and river network with Acr Hydro Tools and SWAT are all desirable, but the SWAT is more convenient. The quality of river network extraction is dependent on DEM contour and also dependent on whether the DEM is tangent with the total basin export or not.

**Keywords:** DEM; plain river network; Acr Hydro Tools; SWAT

收稿日期: 2016-11-04

修回日期: 2016-12-02

资助项目: 宁波市环境保护局重大招标项目“宁波市地表水环境营养盐污染特征及控制措施研究”(HK2015000135)

第一作者: 李天昊(1995—), 男(汉族), 吉林省公主岭市人, 硕士研究生, 研究方向为水环境保护与模拟。E-mail: 670396629@qq.com。

通讯作者: 王侃(1977—), 男(汉族), 浙江省宁波市人, 博士, 副教授, 主要从事环境规划与管理、环境污染模拟与控制方面的研究。E-mail: wangkan@nbu.edu.cn。

自动化提取河网是为了获取河流参数信息,如河道所占面积、河道的长度、宽度、深度和汇流累积量等,进而再获取流域边界、面积以及坡度等流域参数信息,可为区域水文水利、给水排水、水土保持等方面的研究与工程落实提供数据参考,也可为水文建模及面源污染等提供水文参数。因此河网信息的有效提取一直是水文研究中的热点问题。现今,伴随着计算机时代的迅猛发展和高科技产品的迅速更新换代,河网提取和流域划分的软件工具也越来越多,如 Acr Hydro Tools, SWAT, ArcGIS 水文模块、River Tools 等,而本文采用 Acr Hydro Tools 与 SWAT 进行研究。针对河网提取,大量的研究<sup>[1-7]</sup>一致认为,在平原或平坦区域,由于 DEM 本身的分辨率限制、所含信息限制和数据误差等原因,并且利用 DEM 自动化提取河网的各种软件工具及其算法均不能很好地考虑随机因素对河网提取的影响,这导致河网的提取常受到洼地与平地效应的影响。为此许多学者提出了良好的想法与改进,如 Tribe<sup>[8]</sup>与 Martz 等<sup>[9]</sup>认为汇水面积阈值应该因地貌的不同而不同。Gyasi-Agyei 等<sup>[10]</sup>则提出了基于 DEM 提取河网时正确估计汇水面积阈值的方法。于森等<sup>[11]</sup>使用了一种定义了溢出高程概念的新填洼算法来提取流域水系。周德民等<sup>[12]</sup>以 Acr Hydro Tools 工具配合改进升值裂开算法编制的程序提取洪泛平原水系。但这些方法还是较难应对平原河网的提取困境,然而河网水系的正确提取却是水文分析的前提和基础,只有提取出正确的河网,其它后续的分析才会有意义。目前国内就浙北平原进行河网自动化提取的相关研究并不是很多,因为平原区尤其是沿海平原区密集的城市群、大规模开挖人工河道、建造城市人工暴雨管网和排污管网等人类活动都极大地影响着河网提取的精度,极易对河网提取造成一定干扰,进而产生断流、逆流或平行河网<sup>[13-15]</sup>。因此本文通过 Acr Hydro Tools 和 SWAT 工具,以一种新的视角来提取平原河网,即从 DEM 的裁剪入手,将 DEM 裁剪成某种轮廓,并在此轮廓的 DEM 上提取出与实际相符的平原河网。本文的研究成果不仅对于完善水系自动化提取具有重要意义,而且对低平地区的水土保持、防洪防汛、水污染治理以及生态修复等有着重要的参考价值。

## 1 研究区概况与数据源

### 1.1 研究区概况

姚江流域是浙江省八大水系之一甬江的一级支流流域,临近杭州湾,主要位于宁波市的西北部,其流域面积约为 1 920 km<sup>2</sup>,其中宁波市境内约 1 525

km<sup>2</sup>。姚江发源于宁波余姚市大岚镇夏家岭,流经宁波的余姚市、鄞州区、江北区和海曙区,之后与南来的奉化江一起汇入甬江构成甬江水系而汇入东海,其源头至流域总出口的相对高差约 772 m。姚江是宁波市的“母亲河”,其干流全长约 104 km,它既是一条集水利、农灌、渔业、航运、饮用和历史文化等功能于一体的重要水系,又是一条主要洪水通道,受地形特征、季风气候和台风共同影响下易发生洪水,研究区内的余姚市在 2013 年发生了特大暴雨洪水,给当地带来了严重的损失。因此姚江对宁波地区的经济和社会发展有着极其重要的影响。

### 1.2 数据源与数据处理

本文的基础数据包括高精度 DEM(10 m×10 m),真实矢量河网(正确汇水方向),姚江流域范围图,宁波行政边界图。并在 ArcGIS 10 软件支持下将所有相关的 GIS 图层的坐标投影进行一致性转换,所有的图层均采用高斯-克吕格(Gauss\_Kruger)等角投影坐标系,地理坐标系为 CGS\_NINGBO 2000。此外为了达到研究目的,本文将先提取出整个姚江流域,再以宁波行政边界得出宁波境内的姚江流域范围。因此如果将 DEM 直接沿着整个姚江流域范围裁剪,则提取的流域范围必定会小于或等于实际的流域范围。所以本文以整个姚江流域范围为参照,将原始 DEM 裁剪成规整型 DEM 与临近型 DEM 两种类型,从而以裁剪后的 DEM 来说明本文的核心问题(注:规整型 DEM 是轮廓规整的或为矩形的,不与流域出口断面相切且能将实际流域边界完全包含在内的一种类型;临近型 DEM 是轮廓接近实际流域边界,且与流域出口断面相切的能将实际流域边界完全包含在内的一种类型)。

## 2 研究方法

### 2.1 基础原理与算法

目前无论哪一种软件或工具,它们基于 DEM 提取河网的基本原理多数是一致的,Acr Hydro Tools 与 SWAT 也不例外,一般分为以下几个过程:填洼与“burn-in”真实河网(真实河网导向下的无洼地 DEM)、流向分析(河流流向栅格图)、汇流分析(汇流累积量栅格图)、河网连接与矢量化。

2.1.1 填洼与“burn-in”真实河网 进行河网提取的基本前提是无洼地的 DEM 图,然而原始的 DEM 图都或多或少的存在着洼地。洼地的存在会使提取的河网出现断流现象,因为洼地的高程比周围低,呈现出凹陷状,水流至此便无法流出。因此填洼会赋予这些凹陷洼地其与之相邻栅格中最低的高程值,以便

水流延续流出;DEM 数据本身不包含河流信息,我们需要真实河网的辅助,增加空间信息量,保证河流计算的精度,使生成的河网更加真实准确。许多学者取得的良好研究成果也是借助于真实河网的辅助作用<sup>[13-16]</sup>。“burn-in”真实河网的实质是将真实河网进行栅格化,把栅格化的河网叠加在 DEM 上,保持河网所在栅格的高程值不变,而将其他非河网所在栅格整体增加一个高程值,这样就使得河网栅格与非河网栅格的高程差更加明显,增强了河网栅格的汇水能力,使其更容易形成河道。

2.1.2 流向分析 对于流向的分析确定,目前应用最广的是 O'Challaghan 等在 1984 年提出的坡面流累计算法即单流向  $D_8$  算法<sup>[17]</sup>。 $D_8$  法也叫单流向最大距离权落差法,它是假设一个网格中的水流只有 8 种可能的流向,即只能流入与之相邻的 8 个网格中,8 个方向分别用不同的代码表示:1-正东,2-东南,4-正南,8-西南,16-正西,32-西北,64-正北,128-东北。本文以 0 表示中心栅格(图 1)。

32	64	128
16	0	1
8	4	2

图 1 水流流向编码图

一个栅格单元的水流流向为指向与之相邻的 8 个网格中能形成最陡坡度的那个单元方向。坡度按公式(1)计算:

$$\theta_{xy} = \arctg[(h_x - h_y)/D] \quad (1)$$

式中: $h_x$ ——所在栅格单元高程; $h_y$ ——相邻栅格单元高程; $D$ ——两个栅格几何中心点之间的直线距离。若两栅格单元为水平或垂直方向相邻,则  $D$  就是单元格长度;若为对角线方向,则  $D$  为 $\sqrt{2}$ ×单元格长度。根据该式逐个自动确定出 DEM 中所有栅格的水流流向,最终得到关键的流向栅格图。

2.1.3 汇流分析 该分析大致分为两个过程,首先是基于流向栅格图生成汇流累积栅格图,其原理是假设每个栅格中含有 1 个单位的水量,在  $D_8$  流向法的作用下高程值低的栅格汇集了来自其上游栅格所带的单位水量,这样高程值低的栅格便有了一定的汇流累积值,因此汇流累积值越大的栅格,就越容易形成地表径流;第 2 个过程是为河流的呈现设置汇流累积量阈值,又叫汇水面积阈值。此过程的原理是给定一

个汇水面积阈值,将汇水面积超过该阈值的栅格视为河道栅格,这样把汇水面积大于给定阈值的栅格连接起来,就形成了栅格河网。因此,汇水面积阈值是支撑一条河道存在的所需要的最小汇水面积阈值<sup>[18]</sup>。一般最小汇水面积阈值应设定在汇流栅格图中最大栅格单元值的 0.5%~1%之间<sup>[19]</sup>。在这之间,阈值越大,超过阈值的栅格越少,因此河流越短,河流数目越少,河网越稀疏。阈值越小,超过阈值的栅格越多,因此河流越长,河流数目越多,河网越稠密。但是当阈值降低到 0.5%以下时,并不会使提取的河网信息过于详细,反而会降低处理效率并且容易出现伪河道。而阈值达到 1%以上,则在相对平坦的地区不能得到较为详细的河流信息,也会影响流域边界提取的精度。

## 2.2 提取河网的方法

2.2.1 Acr Hydro Tools 的提取方法 Acr Hydro Tools 是由美国开发的一个 ArcGIS 与水文地理领域知识相结合的水文地理数据模型,它是一种水文时空序列数据模型,可以应用地理基础资料来辅助分析地表水流的动态过程并获取更多的水文信息<sup>[20]</sup>。本文应用 Acr Hydro Tools 工具,在轮廓不同的 DEM 与真实河网辅助下对姚江流域平原河网进行提取,其提取流程为:①对真实河网先后采用“Assign Stream Slope”和“Burn Stream Slope”指令,以提高河道在 DEM 空间位置上的准确性。②通过“DEM Reconditioning”指令,以“AGREE”算法对 DEM 进一步处理,也叫 DEM 重建。其原理是利用真实河网及指定的缓冲区修正河道缓冲区内的 DEM 高程数据,进一步保证 DEM 与真实河网的一致性。③通过“Fill Sinks”指令进行全部填洼,得到真实河网导向下的无洼地 DEM,至此完成 DEM 预处理工作。④先以“Flow Direction”,“Flow Accumulation”和“Stream Definition”计算流向与汇流累积量,并设置最佳汇水面积阈值。再以“Stream Segmentation”,“Catchment Grid Definition”,“Catchment Polygon Processing”和“Drainage Line Processing”最终得到“DrainageLine”。最后分别在“DrainageLine”和“Catchment Polygon Processing”中导出河流与集水多边形,便完成了 Acr Hydro Tools 提取河网和确定流域的工作。

2.2.2 SWAT 的提取方法 SWAT 是美国农业部研发的一种分布式流域水文模型,可以模拟不同土壤类型、土地利用方式、气象、径流、泥沙和物质运移与转化等的水文物理过程,进行流域特征的自动提取和

水文过程模拟<sup>[21]</sup>。同样,本文应用 SWAT 工具在轮廓不同的 DEM 与真实河网辅助下对姚江流域平原河网进行提取,其提取流程为:① 添加并进行 DEM 设置与 Burn in 真实河网。② 以“Flow direction and accumulation”指令自动化进行填洼、计算流向与汇流累积量,并在其下方设置最佳汇水面积阈值。③ 以“Creat stream and outlets”和“Edit Manually”指令创建河网与出水口,并参考真实河网和流域范围编辑出水口点。④ 通过“Whole Watershed Outlet(s)”和“Delineate Watershed”指令圈选出水口点并划分流域。⑤ 通过“Calculate Subbasin parameters”指令计算河道与流域的相应参数,便完成了 SWAT 提取河网、划定流域以及获取相关参数的全过程。

### 2.3 评价方法

为了检验提取效果,以提取的流域总面积与河流总长度为定量分析的主要指标,通过相对误差公式、河网套合差公式和 Visual Similarity Duplicate Image Finder 软件对其进行综合评价验证。其中相对误差公式用于验证流域总面积和河流总长度的提取值与实际值之间的误差;河网套合差公式<sup>[22]</sup>是为了定量描述提取的河网与实际河网的吻合程度;而图像比对软件 Visual Similarity Duplicate Image Finder 是对所提取流域与河网的空间组合图像进行精度分析,获取提取的空间组合图像与实际的空间组合图像的相似度。相对误差  $R_e$  计算公式如公式(2):

$$R_e = (Q_s - Q_m) / Q_m \times 100\% \quad (2)$$

式中: $Q_s$ ——模拟值; $Q_m$ ——实际值;若  $R_e$  为 0,则说明模拟值和实际值完全一致; $R_e > 0$ ,说明模拟值偏大; $R_e < 0$ ,说明模拟值偏小; $R_e$  的绝对值越接近于 0,则误差越小。

河网套合差  $D$  的计算公式<sup>[22]</sup>如式(3):

$$D = \sum A_i / S \quad (3)$$

式中: $A_i$ ——两条河网叠加产生的细碎多边形的面积; $S$ ——流域总面积。 $A_i$  的面积通过 ArcGIS 中的要素转面(feature to polygon)来实现。河网套合差越小,表明河网吻合程度越高。试验表明,当河网套合差小于 2% 时,河网吻合程度较高,小于 3% 时,吻合程度可以接受,大于 3% 时吻合程度较差<sup>[22]</sup>。采用河网套合差来评价提取的河网精度,简单可信,适用于河网提取精度评价。

Visual Similarity Duplicate Image Finder 是一款图像相似度对比软件,相似度越接近 1,则两个图像越相似。本文在此软件中将相似度阈值设为最低即 50%,以此进行图像相似度信息的获取。

## 3 结果与分析

### 3.1 提取结果

3.1.1 Acr Hydro Tools 的提取结果 以 Acr Hydro Tools 工具先后在规整型 DEM、临近型 DEM 上均以真实河网为辅助,以前文的提取流程对姚江流域的平原河网进行提取,再以宁波市行政范围为界获取宁波境内的姚江流域与河网,最终提取结果如图 2 所示。

从图 2 可直观看出在规整型 DEM 上的提取结果,许多河流的下游皆位于平原或平坦区域,对它们的提取结果与实际情况有极大的偏差甚至无法提取出来,以致部分河流的大块区域无法提取,流域出口附近的区域也与实际情况相差较大。临近型 DEM 上的提取结果,无论是在山丘地区还是平原或平坦区域,其所提取的河流、流域都与实际情况十分接近。

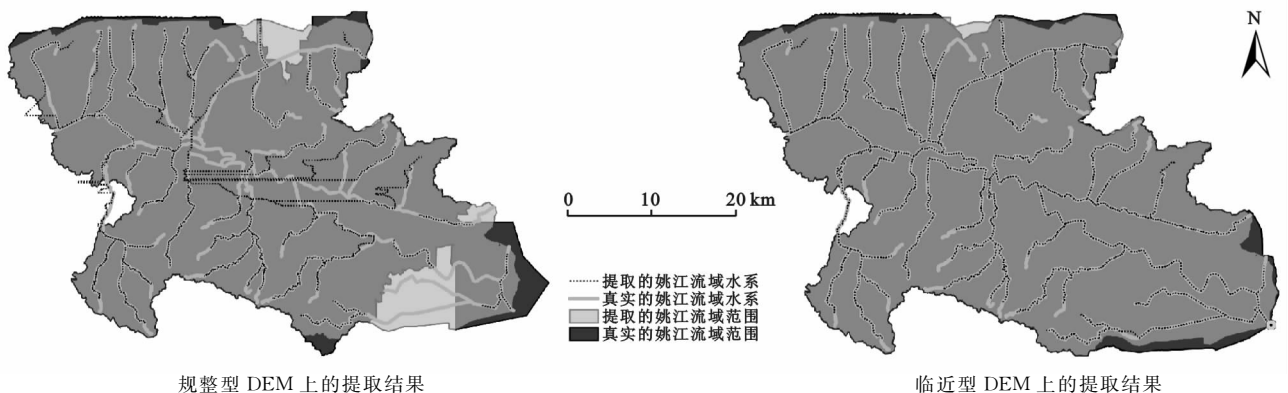


图 2 Acr Hydro Tools 提取姚河流域及河网的结果

3.1.2 SWAT 的提取结果 同样,以 SWAT 工具先后在规整型 DEM、临近型 DEM 上均以真实河网

为辅助,按照前文的提取流程对姚江流域的平原河网进行提取,再以宁波行政范围为界获取宁波境内的姚

江流域与河网,最终提取结果如图 3 所示。由图 3 可直观看出,在规整型 DEM 上所提取的河流、流域与实际情况相差极大,尤其是流域北部、中部和东南部

的广大地势平坦区域,只有少数河流的上游区域有着较好的吻合程度。在临近型 DEM 上所提取的河流、流域都与实际情况十分接近。

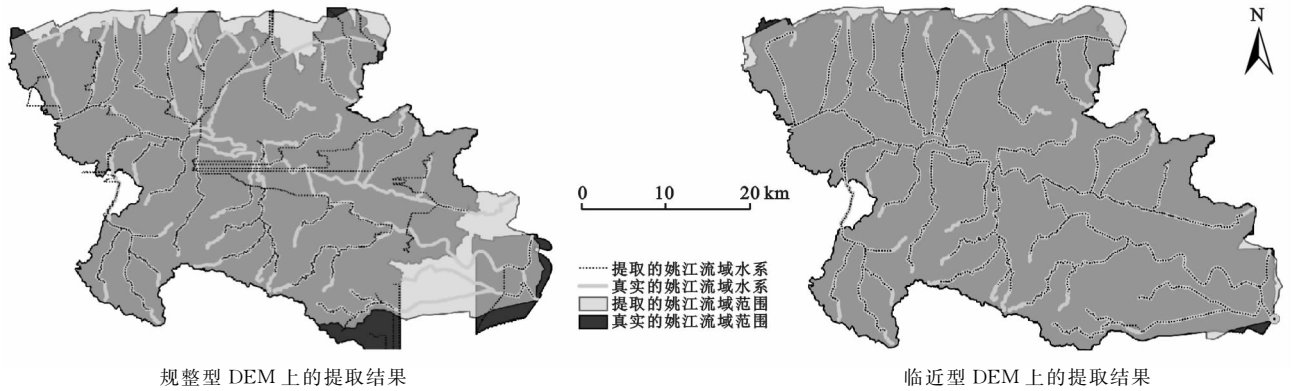


图 3 SWAT 提取姚河流域及河网的结果

### 3.2 精度评价与原因分析

运用相对误差公式、河网套合差公式和 Visual Similarity Duplicate Image Finder 软件对以不同工具

在不同轮廓 DEM 上的提取结果进行精度评价与分析,Acr Hydro Tools 和 SWAT 方法提取的结果信息详见表 1—2。

表 1 Acr Hydro Tools 信息提取结果

提取工具	基础数据	研究要素	实际值	提取值	相对误差/ %	河网套合差/ %	与真实组合图像的相似度/%	流域出口
Acr Hydro Tools	规整型 DEM 与真实河网	流域总面积/km <sup>2</sup>	1 525.19	1 478.97	-3.03	7.17	60	错误(无)
		河流总长度/km	562.28	575.14	2.29			
	临近型 DEM 与真实河网	流域总面积/km <sup>2</sup>	1 525.19	1 557.11	2.09	0.14	92	三江口
		河流总长度/km	562.28	563.87	0.28			

表 2 SWAT 信息提取结果

提取工具	基础数据	研究要素	实际值	提取值	相对误差/ %	河网套合差/ %	与真实组合图像的相似度/%	流域出口
SWAT	规整型 DEM 与真实河网	流域总面积/km <sup>2</sup>	1 525.19	1 410.61	-7.51	10.16	58	错误(无)
		河流总长度/km	562.28	587.47	4.48			
	临近型 DEM 与真实河网	流域总面积/km <sup>2</sup>	1 525.19	1 492.28	-2.16	0.14	90	三江口
		河流总长度/km	562.28	543.42	-3.35			

根据两个表的验证结果,从相对误差上来看,Acr Hydro Tools 在规整型 DEM 上所提取的流域总面积和河流总长度的相对误差分别为-3.03%和2.29%,而在临近型 DEM 上分别为2.09%和0.28%;SWAT 在规整型 DEM 上所提取的流域总面积和河流总长度的相对误差分别为-7.51%和4.48%,在临近型 DEM 上分别为-2.16%和-3.35%。因此,无论是 Acr Hydro Tools 还是 SWAT,对于研究区域均是在临近型 DEM 基础上所提取的信息相对误差较小,更接近真实情况。曾红伟等<sup>[13]</sup>和唐从国等<sup>[23]</sup>的研究表明,基于 DEM 提取的流域面积与实际流域面积最大误差不超过 9% 便可满足精度需要。虽然本文提取

的流域总面积与实际流域面积的相对误差均不超过 9%,但是仅凭相对误差并不能说明提取结果的可信度。

从河网套合差上来看,Acr Hydro Tools 工具在规整型 DEM 与临近型 DEM 上所得到的河网套合差分别为 7.17% 和 0.14%,而 SWAT 工具分别为 10.16% 和 0.14%。由此可见,两种工具都是在临近型 DEM 上所提取的河网具有很令人满意的河网套合差。因为在规整型 DEM 上其河网套合差最小的仍然为 7.17%,而 7.17% > 3%,说明河网的吻合程度极差。在临近型 DEM 上其河网套合差均为 0.14%,而 0.14% < 2%,说明河网的吻合程度很高。

Visual Similarity Duplicate Image Finder 软件的运行结果显示, Acr Hydro Tools 工具在规整型 DEM 上提取的河流和流域的空间组合与真实河流和流域的空间组合的相似度为 60%, 在临近型 DEM 上的相似度为 92%。而 SWAT 工具在规整型 DEM 上提取结果的空间组合与真实的空间组合的相似度为 58%, 在临近型 DEM 上的相似度为 90%。因此两种工具都是在临近型 DEM 下提取结果的空间组合与真实空间组合具有很高的相似度。

对于流域出口的正确性, Acr Hydro Tools 与 SWAT 同样, 在规整型 DEM 上所得到的错误紊乱且与实际不相符的河网, 尤其是平原或平坦区域, 因此根本无法确定流域的真正出口。而在临近型 DEM 上所提取的流域总出口正是三江口处。因此只有在临近型 DEM 上以真实河网为辅助所提取的流域总出口与实际相符。

从提取结果与评价结果来看, 对宁波姚江流域平原河网的提取, Acr Hydro Tools 与 SWAT 均是在规整型 DEM 基础上的提取效果很差, 大部分与实际不相符。而在临近型 DEM 基础上所提取的河网、流域与实际情况十分接近。因此只有在临近型 DEM 上, 以真实河网为辅助所提取的河网、流域和流域总出口与实际相符合且精度、相似度都很高。分析在两种不同轮廓的 DEM 下提取结果的巨大差异, 笔者认为其原因是由于 burn-in 真实河网, 相应地将非河网所在栅格增加了一个高程值。因此在规整型 DEM 下, 姚江流域的出口处仍有广大没有 burn-in 真实河网的低平地区, 这使得姚江出口的延长线方向超出流域范围的那部分 DEM 的栅格高程值高于姚江河道的栅格高程值, 扰乱了基于 D<sub>8</sub> 算法正常计算流向的流向矩阵和汇流矩阵, 导致了姚江出口处出现了逆流现象, 由于出现逆流现象而识别不到流域总出口, 进而影响到了流域内部其他地势平缓区域河流的流向, 并使其错误紊乱, 最终无法在规整型 DEM 上提取出正确的河流及流域; 而临近型 DEM, 由于其轮廓接近真实流域边界且与姚江流域出口相切, 这样在姚江出口的延长线方向并没有因为 burn-in 真实河网而增加了高程值的 DEM 栅格, 这便迫使 DEM 与姚江相切的点正常的成为流域的总出口点, 进而保证了 burn-in 河网的流向和汇流的正确计算, 最终在临近型 DEM 上提取出准确的河流及流域。此外, 临近型 DEM 可免除因流域周边有广大低平地区而影响提取效果的许多困扰, 如出现更多伪河道和伪流域。

## 4 结论

(1) 在正确提取方法与不断的尝试下, 并借助相

对误差公式、河网套合差公式和 Visual Similarity Duplicate Image Finder 软件进行结果精度评价与分析, 最终表明 Acr Hydro Tools 与 SWAT 工具对流域的河网提取都具有很大的可取性, 但相比之下 SWAT 的操作更加便捷高效且目前已得到越来越多学者的关注。

(2) 不同轮廓的 DEM 以及其是否与流域总出口相切会极大地影响河网提取的质量。因此笔者建议在对平原河网进行提取时, 可尝试先将 DEM 裁剪成临近型 DEM 后再以正确的步骤进行提取。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Sagar R C, Srinivas V V. Effect of DEM source on equivalent Horton-Strahler ratio based GIUH for catchments in two Indian river basins [J]. Journal of Hydrology, 2015, 528(1/4): 463-489.
- [2] O'Donnell G, Nijssen B, Lettenmaier D P. A simple algorithm for generating streamflow networks for grid-based macroscale hydrological models [J]. Hydrological Processes, 1999, 13(8): 1269-1275.
- [3] Garbrecht J, Martz L W. The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models [J]. Journal of Hydrology, 1997, 193(1/4): 204-213.
- [4] 关颖慧, 郑粉莉, 王彬, 等. 基于 DEM 的黑龙江宾州河流域水系提取试验研究 [J]. 水土保持通报, 2012, 32(1): 127-131.
- [5] 宋晓猛, 张建云, 占车生, 等. 基于 DEM 的数字流域特征提取研究进展 [J]. 地理科学进展, 2013, 32(1): 31-40.
- [6] 孙崇亮, 王卷乐. 基于 DEM 的水系自动提取与分级研究进展 [J]. 地理科学进展, 2008, 27(1): 118-124.
- [7] 黄玲, 黄金良. 基于地表校正和河道烧录方法的河网提取 [J]. 地球信息科学学报, 2012, 14(2): 171-178.
- [8] Tribe A. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: A review and a new method [J]. Journal of Hydrology, 1992, 139(1/4): 263-293.
- [9] Martz W, Garbrecht J. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: A review and a new method-comment [J]. Journal of Hydrology, 1995, 167(1/4): 393-396.
- [10] Gyasi-Agyei Y, Willgoose G, De Troch F P. Effects of vertical resolution and map scale of digital elevation models on geomorphological parameters used in hydrology [J]. Hydrological Processes, 1995, 9(3/4): 363-382.
- [11] 于森, 任立良. 基于 DEM 模型的新填注算法 [J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(1): 50-55.

(下转第 178 页)

- [10] 许有鹏. 干旱区水资源承载能力综合评价研究: 以新疆和田河流域为例[J]. 自然资源学报, 1993, 8(3): 229-237.
- [11] 余卫东, 闵庆文, 李湘阁. 水资源承载力研究的进展与展望[J]. 干旱区研究, 2003, 20(1): 60-66.
- [12] 党丽娟, 徐勇. 水资源承载力研究进展及启示[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 341-348.
- [13] 段春青, 刘昌明, 陈晓楠, 等. 区域水资源承载力概念及研究方法的探讨[J]. 地理学报, 2010, 65(1): 82-90.
- [14] 刘昌明, 王红瑞. 浅析水资源与人口、经济和社会环境的关系[J]. 自然资源学报, 2003, 18(5): 635-644.
- [15] 秦莉云, 金忠青. 淮河流域水资源承载能力的评价分析[J]. 水文, 2001, 21(3): 14-17.
- [16] 赵建世, 王忠静, 秦韬, 等. 海河流域水资源承载能力演变分析[J]. 水利学报, 2008, 39(6): 647-651.
- [17] 付玉娟, 何俊仕, 强小慢, 等. 辽河流域各市水资源承载力计算分析[J]. 水土保持研究, 2011, 18(1): 171-176.
- [18] 曾浩, 张中旺, 孙小舟, 等. 湖北汉江流域水资源承载力研究[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(4): 22-25.
- [19] 曹一梅. 滇池流域水资源开发潜力及承载力评价[J]. 水电能源科学, 2013(11): 32-34.
- [20] 杨桂山, 朱春全, 蒋志刚. 长江保护与发展报告[M]. 湖北 武汉: 长江出版社, 2009: 57-65.
- [21] 任俊霖, 李浩, 伍新木, 等. 基于主成分分析法的长江经济带省会城市水生态文明评价[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(10): 1537-1544.
- [22] 张贞遴. 广东省经济社会发展与水资源需求关系研究[D]. 广东 广州: 中山大学, 2006.
- [23] 陆大道. 建设经济带是经济发展布局的最佳选择: 长江经济带经济发展的巨大潜力[J]. 地理科学, 2014, 34(7): 769-772.
- [24] 姚治君, 王建华, 江东等. 区域水资源承载力的研究进展及其理论探析[J]. 水科学进展, 2002, 13(1): 111-115.
- [25] 凌子燕, 刘锐. 基于主成分分析的广东省区域水资源紧缺风险评价[J]. 资源科学, 2010, 32(12): 2324-2328.
- [26] 许朗, 黄莺, 刘爱军. 基于主成分分析的江苏省水资源承载力研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(12): 1468-1474.
- [27] 周亮广, 梁虹. 基于主成分分析和熵的喀斯特地区水资源承载力动态变化研究: 以贵阳市为例[J]. 自然资源学报, 2006, 21(5): 827-833.

(上接第 171 页)

- [12] 周德民, 程进强, 熊立华. 基于 DEM 的洪泛平原湿地数字水系提取研究[J]. 地理科学, 2008, 28(6): 776-781.
- [13] 曾红伟, 李丽娟, 柳玉梅, 等. Arc Hydro Tools 及多源 DEM 提取河网与精度分析: 以洮儿河流域为例[J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(1): 22-31.
- [14] 李勇, 于宏兵, 艾丽娜, 张时佳, 耿丽娟. Arc Hydro 模型提取流域水文信息及精度分析: 以松花江流域为例[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(6): 120-123.
- [15] 郑子彦, 张万昌, 郜庆国. 基于 DEM 与数字化河道提取流域河网的不同方案比较研究[J]. 资源科学, 2009, 31(10): 1730-1739.
- [16] 王立, 李海强, 马放, 等. 基于 SWAT 模型的流域河网提取方法[J]. 中国给水排水, 2014, 30(13): 92-95.
- [17] OCallaghan 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.
- [18] Quinn P, Beven K J, Chevallier P, et al. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models[J]. Hydrological Processes, 1991, 5(1): 59-79.
- [19] David M. ArcGIS Hydro Data Model[M]. USA: The University of Texas at Austin: Center for Research in Water Resources, 2001: 321-330.
- [20] 朱思蓉, 吴华意. Arc Hydro 水文数据模型[J]. 测绘与空间地理信息, 2006, 29(5): 87-90.
- [21] Arnod J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Continental scale simulation of the hydrologic balance [J]. Journal of American Water Resources Association, 1999, 35(5): 1037-1051.
- [22] 詹蕾. SRTM DEM 的精度评价及其适用性研究[D]. 江苏 南京: 南京师范大学, 2008.
- [23] 唐从国, 刘丛强. 基于 SRTM DEM 数据的清水江流域地表水文模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2009, 28(4): 652-655.