

Construction and Application of Spatial Generalized Model of River Network System in Hanjiang Basin

Bo Yang¹, Tong Huang², Song Yang¹, Xiaoying Zhou¹, Zongding Zhang¹

¹Hanjiang Bureau of Hydrology and Water Resources, Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Xiangyang Hubei

²Three Gorges Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Bureau of Hydrology, Yangtze River Water Conservancy Commission, Yichang Hubei

Email: 329549370@qq.com

Received: Oct. 16th, 2020; accepted: Nov. 24th, 2020; published: Dec. 22nd, 2020

Abstract

How to extract the hydrological characteristic parameters of large-scale watersheds scientifically and efficiently to provide basic analysis data for water resources management is an urgent problem. Based on DEM data, the automatic extraction of the river network of the Hanjiang basin was realized using the "IDDEA" algorithm, a spatial generalization model of the river network as constructed using binary coding for river network coding, and the hydrological characteristics at any point in the basin can be extracted. The study could provide technical support for water resources management and decision-making.

Keywords

DEM, Hanjiang Basin, Drainage Networks, Channel Coding, Hydrological Characteristics

汉江流域河网水系的空间概化模型构建与应用

杨波¹, 黄童², 杨松¹, 周晓英¹, 张宗定¹

¹长江水利委员会水文局汉江水文水资源勘测局, 湖北 襄阳

²长江水利委员会水文局长江三峡水文水资源勘测局, 湖北 宜昌

Email: 329549370@qq.com

收稿日期: 2020年10月16日; 录用日期: 2020年11月24日; 发布日期: 2020年12月22日

摘要

如何科学高效地提取大尺度流域水文特征参数, 为水资源管理提供基础分析数据, 是当前生产需要中急需解决
作者简介: 杨波(1973-), 男, 湖北襄阳人, 汉族, 高级工程师, 主要从事水文水资源及河道勘测。

文章引用: 杨波, 黄童, 杨松, 周晓英, 张宗定. 汉江流域河网水系的空间概化模型构建与应用[J]. 水资源研究, 2020, 9(6): 645-652. DOI: 10.12677/jwrr.2020.96070

的问题。本文基于DEM、采用“IDDEA”算法实现了汉江流域水系河网的自动提取，采用二叉树二元编码进行河网编码，构建了汉江流域河网水系的空网概化模型，提取了汉江流域内任意涉水工程点的流域水文特征参数信息，为流域水资源管理和技术决策提供支撑。

关键词

DEM, 汉江流域, 水系提取, 河网编码, 流域特征参数

Copyright © 2020 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

提取流域河网水系的传统方法主要是采用人工查找河流线进而得到流域的河网水系以及相关流域水文参数，不仅耗时，而且主观性较强。随着GIS技术在水文模拟领域的广泛应用，直接基于DEM提取河网水系已经成为当前获取流域水文特征信息的一种重要方法。目前，常采用“AGREE”算法进行DEM值预处理，通过实测水系信息量来修正原始DEM值，以此提高河网提取的精度。何江[1]在基于DEM与遥感的数字流域水系提取研究中，将从遥感信息提取DRLN修正原始DEM，以此提取秦淮河流域水系。林凯荣[2]等在汉江流域数字河网的构建中，利用遥感影像获得的自然流域水系矢量数据对DEM进行了处理。

本文基于GIS平台采用“IDDEA”算法叠加矢量化的主干河流水系修正DEM，依据河网密度与集水面积阈值来确定合理的集水阈值，进而实现基于DEM准确提取汉江流域水系河网。由于常规的二叉树编码存在迭代运算庞大、效率较低缺点，本文研究采用二叉树二元编码，实现汉江流域水系河网编码，构建汉江流域河网水系的空网概化模型，实现监测点-河段-子流域的拓扑关联，模型构建后可以提取流域内任意涉水工程点控制的流域水文参数信息，同时也可实现水文模型各计算要素的逻辑组织与管理，根据各要素的逻辑关系、连通性确定上下游关系进而快速的追溯源头。

2. 研究区概况及数据

2.1. 汉江流域概况

汉江发源于秦岭南麓，襄阳以上河流总体流向东，襄阳以下转向东南，于武汉市注入长江，干流全长1577 km，流域面积约 $15.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ [3]。流域地势西高东低，西部秦巴山地高程1000~3000 m，中部南襄盆地及周缘丘陵高程在100~300 m，东部江汉平原高程一般在23~40 m。西部最高为太白山主峰，海拔约为3767 m，东部河口高程约为18 m，干流总落差约为1964 m。山地约占55%，主要分布在西部，为中低山区；丘陵占21%，主要分布于南襄盆地和江汉平原周缘；平原区占23%，主要为南襄盆地、江汉平原及汉江河谷阶地；湖泊约占1%，主要分布于江汉平原。

2.2. SRTM DEM 数据

研究区DEM数据来源于中科院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站公开发布的V4.1版SRTM DEM数据产品，该产品由美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合测量，数据分为30 m和90 m分辨率两类，由于仅有90 m分辨率的DEM对外实现共享公开。因此，本文采用空间分辨率为90 m的SRTM DEM，主干河流根据WGS84坐标的影像，进行矢量化获取，并转换为shp文件进行套合。

3. 基于 DEM 自动准确提取河网

3.1. DEM 预处理

由于 DEM 在内插处理过程中存在一定的数据异常, 使得 DEM 数据的表面存在一些真实的洼地和假洼地。由于洼地的存在, 导致基于 DEM 提取的河网产生不合理的中断, 无法得到洼地内合理的水流方向, 从而降低了提取河网的精度。因此, 在进行水流方向的计算之前, 应对原始的 DEM 数据进行预处理, 采用 IDDEA (Inverse Distance Drainage Enforcement Algorithm) [4] 算法对原始 DEM 进行修正, 迫使获取正确的水流方向。

采用实测水系资料辅助修正原始 DEM 高程值, 基于 DEM 提取流域河网的方法提取虚拟河网水系, 对没有实测水系作为辅助信息提取河网以及有实测水系作为辅助信息的两种情况下提取河网进行对比, 如图 1(a)、图 1(b) 所示, 可以看出有实测水系作为辅助信息对原始 DEM 进行修正, 采用“IDDEA”方法提取得流域河网在中下游平原区精度更高。

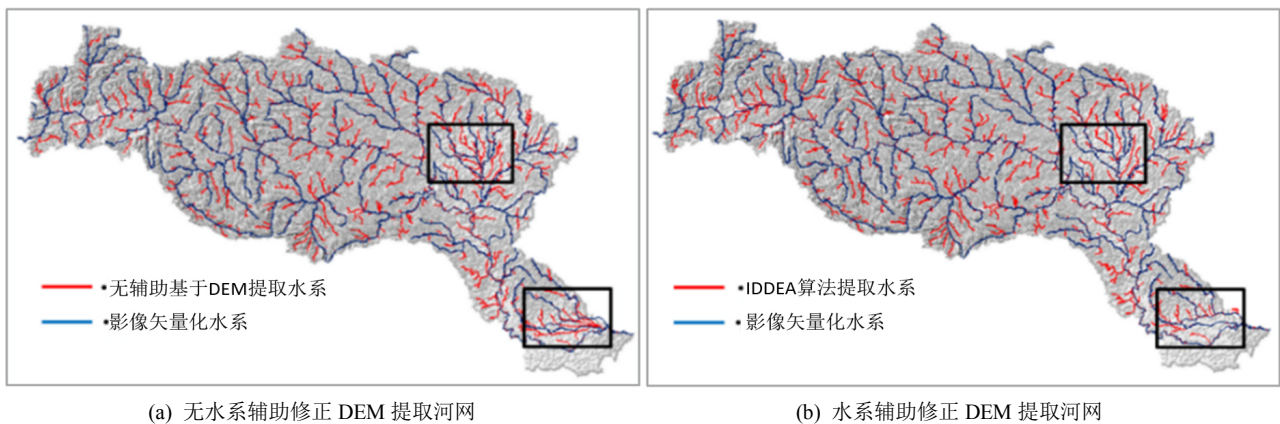


Figure 1. Comparison diagram of river network extraction with and without drainage aided modified DEM

图 1. 有无水系辅助修正 DEM 提取流域河网对比示意图

3.2. 集水阈值定量确定及河网生成

研究区域内汇流累积量栅格中各个栅格单元的汇流能力是根据通过流入该栅格单元的所有栅格汇流量的总和所确定。当栅格单元的汇流累积量大于某一给定阈值时, 认为该栅格为河网单元, 通过栅格二值化, 由此得到地表水流路径构成的栅格网络, 然后通过栅格数据转矢量数据的方法得到区域内的矢量河网。汇流累积量阈值的选取对基于栅格 DEM 提取流域的水文特征信息影响较大, 因此, 如何能够准确地设置合理的汇流累积量阈值值得广泛研究。本文比较分析 21 组不同阈值下提取的河网水系, 通过研究区域的总体面积和河网的总长度计算不同汇流累积量阈值下的河网密度。统计不同集水面积阈值下的河网长度、河网密度, 如图 2 所示。

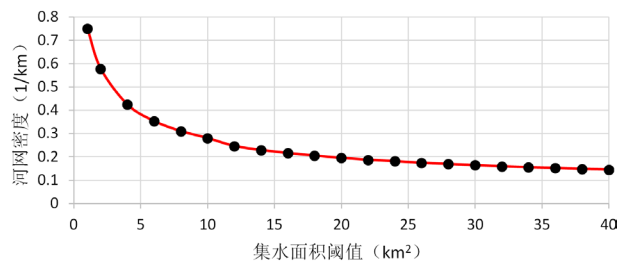
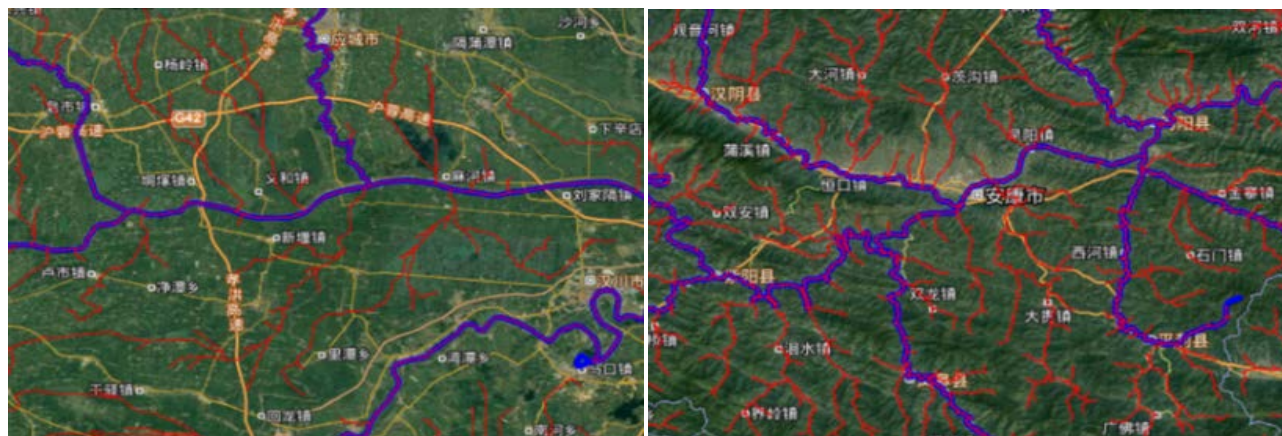


Figure 2. The relation graph of catchment area threshold and river network density

图 2. 集水面积阈值与河网密度关系曲线图

从图 2 中可以看出当集水面积阈值比较小时, 河网密度很大, 随着集水面积阈值变大, 河网密度开始有一个降低趋势, 使得河网密度变化变得平缓, 当集水阈值为 12 km^2 时, 变化趋于稳定。可以初步判断, 汉江流域采用集水阈值为 12 km^2 提取流域特征较为合适。



(a) 汉江流域下游平原地区 (b) 汉江流域上游山区
(图中红线—代表“基于 DEM 提取水系”, 图中蓝线—代表“根据影像矢量化的主干水系”)

Figure 3. Extraction of water system and image contrast map based on DEM

图 3. 基于 DEM 提取水系与影像对比图

根据“IDDEA”算法以及定量确定集水阈值的方法, 本文提取的汉江流域水系与影像图进行对比, 见图 3, 结果显示: 汉江流域上游山区水系吻合度较高, 下游平原地区有主干河流修正情况下, 主干河流吻合一致。

4. 基于二叉树的河网编码

流域内复杂密集的河网数据较为庞大, 如果仅通过河网属性中存储的拓扑关系运算实现流域内水系河网拓扑关联查询, 必然降低计算效率。因此, 需选择一种高效的编码方法, 能够快速地获取河段之间的逻辑关系, 其要求需满足以下两个方面: 一是要求依据编码可以在河网中进行河段的直接定位, 而避免低效率的遍历或搜索; 二是要求编码本身具备较显著的拓扑意义, 能够直接进行拓扑关系运算, 便于识读。

4.1. 河网拓扑结构分析

基于 DEM 提取的流域河网, 可根据水流方向确定水系河网中每条河段的上下游关系, 如图 4 所示, 河网中的河段之间通过河段与节点的关联构建河段之间的上下游拓扑关系。图 4 中箭头代表河段的水流方向, 河段 3 的起始节点(FromNode)是河段 1 和河段 2 的末节点, 河段 3 的末节点(ToNode)是河段 4 的起始节点, 以此构成整个河网每个河段之间的上下游关系。

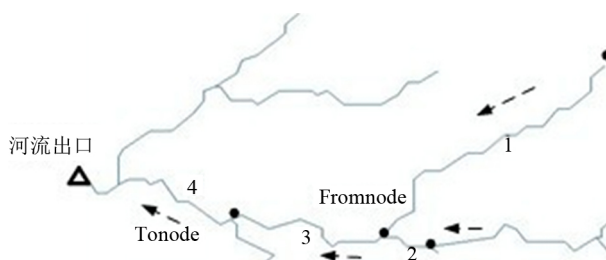


Figure 4. Extracting river network topology map based on DEM

图 4. 基于 DEM 提取流域河网拓扑结构图

4.2. 二叉树二元编码算法实现

在大尺度、复杂流域的河网模型构建中,河网编码尤为重要,需针对河网的复杂性提出相应的编码方案[5]。研究二叉树的编码,主要常见的为二进制编码,在流域河网编码中常对河网进行二进制字符串编码的方法:

- 1) 对于出口河段的二进制编码可以记为“0”;
- 2) 从出口河段开始向上游搜索,记左侧二进制编码为上一级编码“0”;右侧二进制编码,当可能遇到的支流河段赋值为“1”,可能遇到的干流河段赋值“0”;
- 3) 重复以上步骤至遍历所有河段。

虽然,这样可以实现流域内所有河段的二进制编码(如图 5(a)所示),但是,这种编码的针对尺度较大的流域编码,编码长度有所限制。因此,需要采用二元编码方式对大流域进行编码(如图 5(b)所示)。

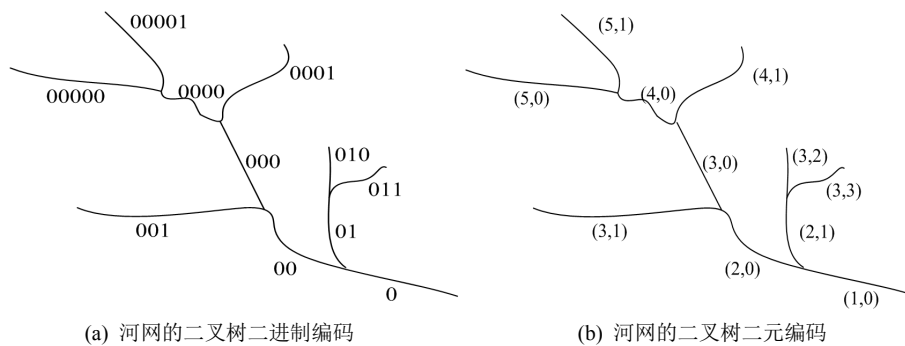


Figure 5. Two ways of binary tree coding for river network are illustrated
图 5. 河网的二叉树编码两种方式示意图

如图 5(b)所示,流域河网中的每个河段以二元编码的形式(L_m, V_n)表示。其中 L_m 是该河段字符串的长度, V_n 是该河段二进制字符串的十进制数值。从河网的拓扑结构关系得出, L_m 表示河段距离流域出口的远近(二叉树节点所处的层), V_n 表示该河段距离干流的远近(二叉树节点所处层内编码), 以此来表达河网中河段之间的竖向关系。

在基于二叉树的编码中,并没有对二叉树中横向关系给出确定方法,因此不能够确定出横向两个河段的干支流关系。根据 SrefanUhlenbrook 等的研究,河道宽度与集水面积呈对数关系[6] [7]:

$$B = \alpha \ln(A_s) + \beta \quad (1)$$

式中: A_s 为各栅格的上游集水面积; B 为河道宽度; α 和 β 为经验参数,表现了流域中数字水系的整体特性。根据公式 2, 可以得出每个河段的河道宽度随着该河段上游集水面积总和的增大而增大,所以, 本文将利用每个河段的上游集水面积总和来判定流域河网中两个河段之间干支流关系, 通过河网二叉树二元编码的算法实现汉江流域的河网编码, 算法流程如图 6 所示。

流域内的水文对象其主要可分为: ①点对象: 通常包括流域内部的河道源点或者河段出水节点、水文监测站点、水质监测点、取排水口点、水利工程、管理站点以及涵闸泵站等。②线对象(河段): 通过交汇点将河网水系分段, 主要属性有河段名称、河段长度、河段等级、河段的坡降等。③面对象(子流域): 是指使用流域产汇流模型进行计算的水文模型对象, 其包括小流域, 区间流域等。基于 GIS 平台, 将流域内水文对象概化为空间的点、线、面, 通过编码, 从而使水文要素之间形成了完整的拓扑结构关系。

针对如何快速获取某一水文对象对应的上、下游对象, 可根据河网二元编码的 BSLength 和 BSValue 两个分量值, 无需迭代实现搜索:

- 1) 若对给定某一河段, 该河段的二元编码为(BSLength, BSValue), 其上游河段进行搜索时, 只需根据下式

进行遍历判断搜索。

$$BSLengthSY \geq BSLength \tag{2}$$

$$BSValueSY/2^{(BSLengthSY-BSLength)} = BSValue.$$

式中：BSLengthSY 代表其上游河段的二元编码 L_m 分量值；BSValueSY 代表其上游河段的二元编码 V_n 分量值。

2) 若对给定某一河段，该河段的二元编码为(BSLength, BSValue)，其下游河段进行搜索时，只需根据式(3)进行遍历判断搜索。

$$BSLengthXY \leq BSLength \tag{3}$$

$$BSValue/2^{(BSLength-BSLengthXY)} = BSValueXY.$$

式中：BSLengthXY 代表下游河段的二元编码 L_m 分量值；BSValueXY 代表下游河段的二元编码 V_n 分量值。

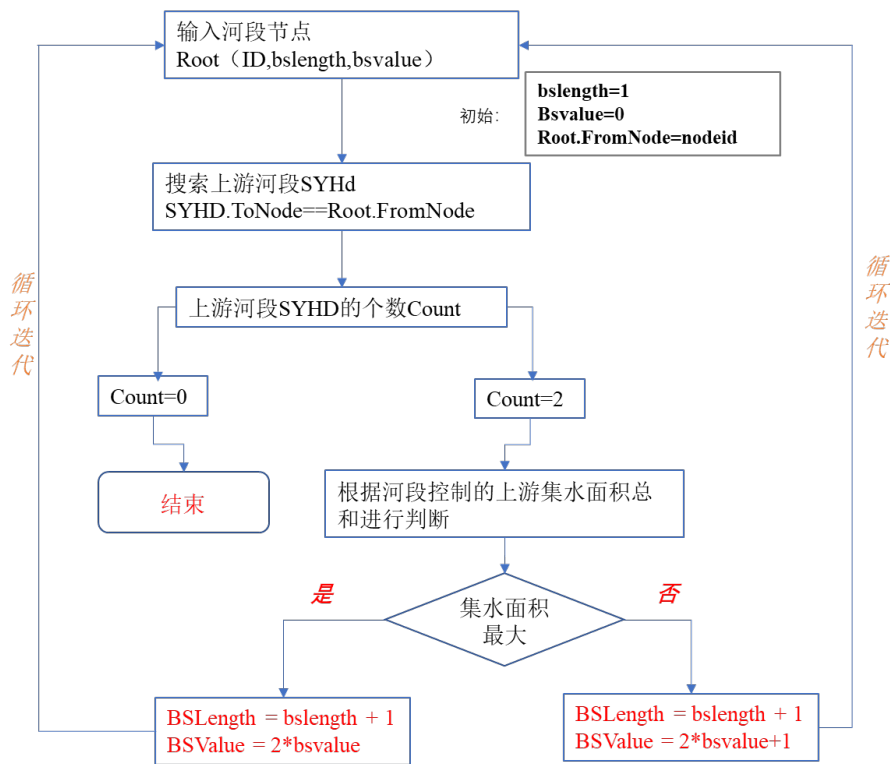


Figure 6. River network binary tree binary coding algorithm diagram
图 6. 河网二叉树二元编码算法图

5. 应用实例

在山洪灾害分析评价、水利水电工程设计、涉水工程防洪评价等项目中，通常需要计算中小流域设计洪水。推求设计洪水的方法主要有两大类：由流量资料推求设计洪水和由暴雨资料推求设计洪水。但在实际工作中，中小流域地区往往缺乏实测流量资料，而降雨资料一般较多，因此常采用暴雨资料推求设计洪水。提取流域特征信息(面积、河长、比降)是暴雨资料推求设计洪水的前提条件。然而，在设计过程中，特别是对于大流域的基础数据比较匮乏，传统手工量算流域特征信息，效率非常低。

基于 DEM 构建的汉江流域水系河网模型，采用 GIS 技术和.NET 开发平台，设计研发了基于 DEM 的流域水文参数提取软件(软件界面见图 7)，能够满足汉江流域内任意涉水工程点的水文参数自动提取与计算。结合汉

江流域上游某一铁路沿线, 需对沿线涉河桥梁处进行设计洪水计算, 因此, 需对桥梁断面位置进行流域水文特征参数提取, 共计 12 处断面。在缺少大流域的基础数据时, 若采用传统方法人工对照影像图进行分水岭判断, 往往需要约 3 天时间完成, 采用本文提出的方法和研发的软件, 可在 1 个小时内完成所有断面处流域水文特征参数的提取。



Figure 7. Software interface of watershed hydrological Parameters Extraction based on DEM

图 7. 基于 DEM 的流域水文参数提取软件界面

6. 结论和讨论

本文采用“IDDEA”算法叠加部分主干河流矢量水系修正 SRTM DEM 数据, 依据河网密度与集水面积阈值来确定汉江流域水系的集水阈值为 12 km², 进而实现基于 DEM 准确提取汉江流域水系河网, 并于影像数据进行对比。分析基于 DEM 提取的河网拓扑结构关系, 研究并实现采用二叉树二元编码方法对汉江流域水系河网进行编码, 构建汉江流域河网水系的空间概化模型。基于 GIS 以及构建的河网模型开发软件实现流域内任意涉水工程点控制的流域水文参数信息, 同时也可实现流域内水文要素的拓扑组织与管理, 根据各要素的逻辑关系、连通性确定上下游关系进而快速的追溯源头。

本文仅解决了标准河网的编码问题, 并没有对分叉河网、十字形河网和“H”形河网[8][9]等一些复杂的河网进行深入研究, 在河网连通复杂的汉江下游平原地区适用性不强。另外, 本文探讨的水系河网模型可以作为污染源追溯[10][11]、取排水口空间合理性分析、水量平衡、分布式水文模型等的基础数据, 在后续生产实践中开展深入研究。

参考文献

- [1] 何江. 基于 DEM 与遥感的数字流域水系提取研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 河海大学, 2007.
HE Jiang. Extraction of digital watershed water system based on DEM and remote sensing. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese)
- [2] 林凯荣, 雒征, 吴建红, 何新林. 汉江流域数字河网的构建[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2005(6): 725-729.
LIN Kairong, LUO Zheng, WU Jianhong and HE Xinlin. Construction of hydro networks in the Hanjiang basin. Journal of

- Shihezi University (Natural Science), 2005(6): 725-729. (in Chinese)
- [3] 杨杰, 马书英, 张海军, 戚鹏程. 汉江流域 SRTM DEM 的水系提取及验证方法[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2014, 33(7): 947-950.
YANG Jie, MA Shuying, ZHANG Haijun and QI Pengcheng. Extracting Hanjiang river network based on SRTM DEM and its validation. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2014, 33(7): 947-950. (in Chinese)
- [4] NAGEL, D., BUFFINGTON, J. M. and LUCE, C. A simple drainage enforcement procedure for estimating catchment area using DEM Data. NW GIS User Conference, Boise, ID, 17-21 October, 2011.
- [5] 于淼, 陈雪莲. 基于 DEM 的河网河段编码方法[J]. 人民长江, 2009, 40(24): 36-38.
YU Miao, CHEN Xuelian. The coding method of river reach based on DEM. Yangtze River, 2009, 40(24): 36-38. (in Chinese)
- [6] 杨松, 王山东, 卓中文, 张晓平. 基于数字化水系修正 DEM 提取流域河网研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(2): 123-126.
YANG Song, WANG Shandong, ZHUO Zhongwen and ZHANG Xiaoping. Research on extraction of watershed river network based on DEM enhanced by digital river system. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2013, 11(2): 123-126. (in Chinese)
- [7] 李满, 王山东, 杨松, 刘超楠. 基于 DEM 的数字流域河网编码方法研究[J]. 计算机与数字工程, 2014, 42(2): 210-212+226.
LI Man, WANG Shandong, YANG Song and LIU Chaonan. Drainage network codification method based on DEM. Computer & Digital Engineering, 2014, 42(2): 210-212+226. (in Chinese)
- [8] 刘佳嘉, 周祖昊, 贾仰文, 王浩. 基于 DEM 河网干支拓扑关系的子流域编码规则[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(4): 288-293.
LIU Jiajia, ZHOU Zuhao, JIA Yangwen and WANG Hao. A rule for delineation and codification of sub-watersheds based on stem-branch topological relationship of DEM digital river network. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, 41(4): 288-293. (in Chinese)
- [9] 杨旭, 陈建国. 基于 MapGIS 二次开发实现矢量河网拓扑关系的自动编码与统计[J]. 物探化探计算技术, 2019, 41(2): 270-278.
YANG Xu, CHEN Jianguo. The automatic coding and statistics of vector river network topology based on the second development of Map GIS. Computing Techniques for Geophysical & Geochemical Exploration, 2019, 41(2): 270-278. (in Chinese)
- [10] 邓琮. 基于 RS 和 GIS 的旭水河流域非点源污染研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2015.
DENG Zong. Research on non-point source pollution of Asahi River Basin based on RS and GIS. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [11] 蓝志峰, 肖桂荣. 基于流域要素空间关系的水污染溯源研究[J]. 水资源保护, 2019, 35(1): 56-62.
LAN Zhifeng, XIAO Guirong. Water pollution traceability based on spatial relationship of basin elements. Water Resources Protection, 2019, 35(1): 56-62. (in Chinese)