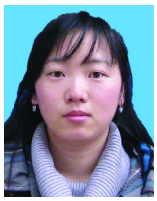

岷江上游流域 DEM 的河网提取

李旭娇[1]，杨武年[1]，曾　超[2]，邬莉莎[1]
（1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室/遥感与 GIS 研究所，四川 成都 610059；
2. 四川师范大学 地理与资源科学学院，四川 成都 610101）

摘　要：DEM 中包含了丰富的地质地貌、水文等信息，是流域分析的主要数据来源之一。详细介绍了利用 DEM 数据提取流域水系信息特征的方法，并以岷江上游为例，对 DEM 进行预处理，然后采用 ArcGIS 9.3 软件平台下 Hydrology 模块提供的 D8 算法来确定水流离开 DEM 栅格单元的方向，并计算流向各栅格单元的水流累积量，再根据给定的集水面积阈值，提取岷江上游水系。实验结果表明，根据 DEM 生成的水系与实际基本相符。

关键词：数字高程模型；岷江上游；河网提取
中图分类号：P208　　**文献标志码**：B　　**文章编号**：1672-4623（2011）04-0058-03

DEM 包含了丰富的地形地貌信息，如高程、坡度、坡向、山脊、山谷、洼地等。因此根据这些地形地貌信息，借助恰当的模型，可以自动提取适当范围内的自然水系。基于 DEM 提取数字水系的方法有很多，常用的有 3 种：①Band 和 Jianzhong Qian [1-2] 用一个窗口扫描 DEM 矩阵来确定数据中存在的洼地，水系的组成部分则由位于洼地内的栅格单元来标记；此法存在一定的缺点，水系标记过程中所产生不连续的水流线，需通过一定方法的处理将不连续的水流线连接起来，尤其在地形平坦及地形较复杂的地方，为了产生合理的自然水系还需对其进行修饰，如修剪、细化。② O'Callaghan 等 (1984) [3] 提出了地表径流漫流模型，通过模拟地表径流在地表的流动来产生水系；其后有许多研究者 Jenson 和 Dominique (1988) [4]、Martz 和 Garbrecht [5] 等都使用了该方法。这种方法原理是：首先根据DEM格网 8 个相邻单元格中最大坡度来确定水流方向，再计算流向此单元格的所有水流累积量，由此确定一个合理的汇水面积阈值，根据此阈值将不低于这个值的单元格标记为水系的一部分，这样可以直接产生一个连续的水流线。由于它基于一定的模型基础来模拟地表径流，因而被认为是较好的方法 [6]。该方法的缺陷是洼地和平坦栅格单元的水流方向无法确定。③闾国年 [7] 等通过研究黄土沟壑地貌的具体特征，采用形态学与水文学相结合的方法，提取了黄土丘陵地区的沟谷网络，取得了很好的效果。此方法在应用时具有很强的针对性，不同地貌形态需重新设置地貌参数，因此其适用性受到一定限制。目前利用 DEM 自动提取水系的软件主要有：ArcGIS 软件中的 Hydrology 水文处理模块、MapGIS 的 DTM 分析中的水文表面流域分析和基于 IDL 开发的 RiverTools 软件等。本研究所采用 ArcGIS 平台提供的 Hydrology 水文模型是基于地表径流漫流模型算法。本文详细介绍利用此模型进行 DEM 预处理、水流方向确定、汇流累积量计算、河网生成等流域水文特征信息提取的处理过程及相关算法，并将该模型运用于岷江上游流域，取得了较好的结果。

1　研究区概况及数据源

岷江上游地处四川盆地丘陵山地向川西北高原的过渡地带，属青藏高原东缘高山峡谷区。区域位置在北纬 30 ° 45′～ 33 ° 09′，东经 102 ° 35′～ 103 ° 56′之间，流域内部海拔高程范围变化在 740 m ～ 6 190 m 之间，平均海拔 3 440 m。都江堰区首以上松潘、黑水、理县的全部以及汶川、茂县的部分地区，流域干流全长 337 km，流域面积约为 212 万 km^2。1 月份平均气温-4.13 ℃，7 月份平均气温 14.15℃，年平均降水量 730 mm ～ 850 mm ；主要有鱼子溪、杂谷脑河、黑水河、大姓沟、寿溪五大支流 [8]。

本研究所采用的DEM数据是由SRTM获得，SRTM（Shuttle Radar Topography Mission）是由美国航空航天局、美国图像测绘局（NIMA）、德国及意大利航天局共同实施的航天飞机雷达地形测量任务 [9-10]。SRTM2 DEM 数据是人类史上第一次从地球轨道高度对地球表面进行雷达三维成像并获取数字高程模型数据 [9-10]。SRTM2-DEM 以独立的栅格像元文件组织数据，并用规则格网像元的灰度值来表征地形高程值。采样间隔为经纬方向各 1 °，即 1 ° × 1 °，像元采样间隔为 1 弧秒或 3 弧秒。以此为基础，SRTM2-DEM 采集的数据

收稿日期：2011-05-26
项目来源：国家自然科学基金资助项目（41071265）；高等学校博士学科点专项科研基金资助项目（20105122110006）。

分为 2 类 SRTM21 和 SRTM23，这两类数据分别为 30 m 和 90 m 分辨率。因仅有 SRTM23 是对外实现共享，故本文采用 90 m 分辨率（见图 1）。

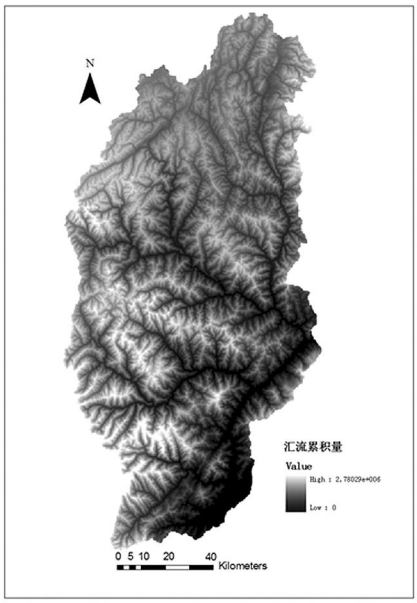

图 1　经裁剪后的岷江上游 DEM（水平分辨率 90 m）

2　DEM 数据预处理

DEM 在生成过程中由于数据噪声、内插方法的影响，常存在凹陷洼地、平地以及陡变的高峰，这些都会给水流线的跟踪带来困难，使水系提取过程复杂化，流域网络间断或不连通。所以在计算水流方向前要先对洼地进行填平，平地进行抬升。

2.1　洼地填平

DEM 数据中，洼地是被高程值较高的栅格所包围的地形单元格，它影响着地表流水过程。 大自然中，水由高向低流，遇到洼地就将其填满，再从洼地最低出口处流出。洼地本身就是一个局部地形的最低点，水流填满洼地后就无法确定水流方向。因此，洼地对水流方向的确定起到重要的作用。所以在进行水系提取过程前，要先对 DEM 数据中存在的洼地根据一定方法对其进行去洼地化处理。无洼地化处理的常用方法为“洼地填平处理”[11]，主要过程是：首先确定一个 3 × 3 窗口或 5 × 5 窗口，用这个窗口扫描 DEM 栅格数据，相邻的 8 个单元格中，将高程不低于本单元格高程的单元格标定为洼地单元格；再以此洼地单元格为中心，扫描位于窗口内的单元格，在下坡处和平地处都能流向洼地单元格的格网，标定为洼地集水区；然后检测每个洼地集水区，从中找出最低的潜在的水流出流点，将这个潜在出流点高程和洼地单元格的高程进行比较，则洼地出流点高程高的确定为凹地。对于这个凹地，对其填平过程是通过将洼地集水区内所有低于出流点的单元格高程赋值为出流点高程。洼地的填平是一项复杂的工作，在一个洼地填平后可能生成新的洼地，所以要重复上述扫描过程，直到所有的洼地都被填平。

2.2　平地抬升

DEM 栅格数据中的平地有原始 DEM 数据获取时本身存在的，也有洼地填平过程中产生的平地。无论是何种平地，对水流方向的计算都会产生一定的影响，因此要对平地进行处理。平地处理的常用方法为“高程增量叠加法”[12]，该方法的基本原理是：对平地范围内相邻 8 个单元格的每个单元格都增加一个不同的微小增量，这个增量值不能超过 DEM 的分辨率，本文中不超过 90。平地单元格经过增加增量后，每个单元格都会有一个明确的水流方向，以便水流汇流累积矩阵的计算，最终为合理的水系的生成奠定了重要基础。

3　河网提取

河网的自动提取主要有 3 个步骤：①计算 DEM 栅格格网的水流方向；②计算格网的上游水流累积矩阵；③河流网络的提取。

3.1　水流方向确定

水流方向是指水流离开格网时的流向。水流方向的确定是地表径流漫流模型的基础，目前有单流向和多流向 2 种，因单流向算法简单方便而得到较为广泛的应用，D8 算法作为最为常用的单流向算法，在水流方向计算过程中，结果较为精确情况下运算速度较其他方法更理想。D8 算法的基本原理是：首先假定每个单元格的水流只有 8 种流向，即东、东南、南、西南、西、西北、北和东北，再用有效特征码来表示这 8 个方向，即 1、2、4、8、16、32、64 和 128。每个格网与相邻格网间存在一定的距离权落差，2 个格网间距离权落差越大，其越有可能为水流流出的格网。所以，通过计算中心格网与相邻格网间的距离权落差，可以有效地得到中心格网最终的水流方向。距离权落差的含义为中心格网和相邻单元格间的高程差与 2 个单元格间的距离比值。距离权落差的计算为：$S = AZ / D$

其中，AZ 为 2 个单元格间的高程差；D 为 2 个单元格间的距离差。图 2 为 DEM 计算后的水流方向。

3.2　水流累积矩阵生成

水流方向确定后，对于 DEM 数据中的每个格网就都有了相应的水流方向。那么汇入某一单元格的水流量就为汇入此单元格的所有上游单元格所产生的水流累积总量。由此可见，水流累积量反映的是单元格汇水能力的强弱程度，即汇流累积量越大，单元格汇水能力越强，则该单元格所代表的地形信息可能为河谷；

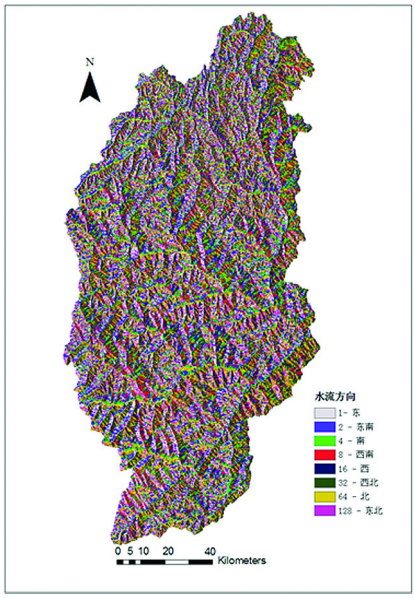

图 2 水流方向计算

反之，代表分水岭特征的单元格，其水流累积量近乎于零。所以河网的提取是以汇流累积量为前提和基础的。如前所述，DEM 格网中，每个格网都有对应的水流方向。假定每个 DEM 单元格初始都有一个单位的水量，那么根据水流方向可以计算流入各单元格的所有上游的水量，则每个单元格就有了相应的汇流累积量值。由此计算得出的结果表明注入水量越多的单元格，其栅格单元的单位水量值越高。

3.3 水系提取

河流网络是在水流累积矩阵基础上生成的，根据汇流累积量计算后的数据，汇入该单元格的单位水量由每个单元格的汇流累积量来表征，则当这个汇流累积量值达到某一特定阈值时，就确定此格网出现在水道之上，然后给这些出现在水道上的栅格赋值为 1，那些小于这一特定阈值的栅格赋值为 0。其中阈值设定的大小影响着河网密度、子流域大小范围等。该研究选取集水面积阈值为 2000 提取河流网络，将各水道按有效水流方向连接起来从而形成流域河网，划分出河流网络系统。

4 实验结果与分析

本文所有的研究过程，均基于现有的 ArcGIS 软件平台。从实验结果（见图 3）上看，从规则格网 DEM 数据中流域河网，对河网提取效率较传统地形图矢量化有了较大提高，且与基础河网相比结果较为准确。但同时也存在一定的问题，如 ArcGIS 软件所包含的水文处理模块本身设计计算的算法的不完善性、集水面积阈值选取的主观性以及 DEM 元数据的精度等问题，都会对最终生成的河网准确度产生影响。因此对上述因子在河网提取中的影响还有待更深层次的探索。

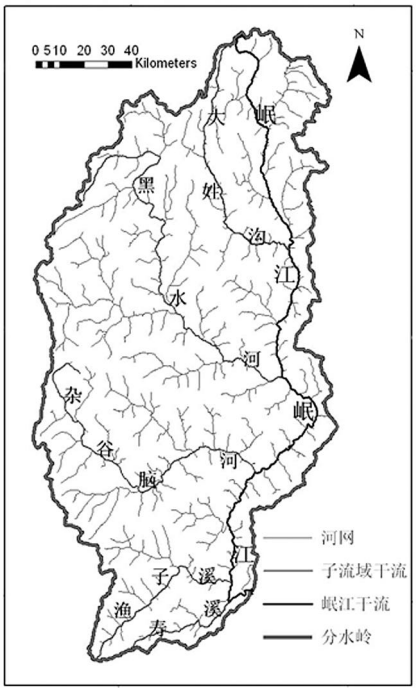

图 3 河网提取结果图

本研究选取岷江上游流域的 DEM 数据，经过数据预处理、水流方向计算、水流累积量计算以及流域网络提取主要的 4 个步骤，在保证水系信息提取较为准确的同时提高了实际工作效率；并将提取的河流网络利用 Google Earth 对其进行空间分布的对比，结果表明与实际较为吻合。本研究成功实现了快速提取河网信息，为进一步研究该地区地形地貌特征奠定了基础。

参考文献

[1] Band, L E. Topographic Partition of Watersheds with Digital Elevation Models [J]. Water Resources Research, 1986,22(1):15-24

[2] QIAN Jianzhong, Ehrich Roger W, et al. DNESYS-An Expert System for Automatic Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data [J].IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing,1990,28(1):29-45

[3] O'Callaghan, J F, Mark, et al. The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data[J].Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1984,28: 323-344

[4] Jenson K, Dominique F O. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographical Information System Analysis [J]. Photogrametric Engineering and Remote Sensing, 1988, 54(11): 1593-1600

[5] Martz, L W. and Garbrecht J. Numerical Definition of Drainage Network and Subcatchment Areas from Digital Elevation Models [J]. Computers & Geosciences, 1992, 18(6): 747-761

[6] 周贵云, 刘瑜, 邬伦. 基于数字高程模型的水系提取算法[J]. 地理学与国土研究, 2000, 16(4):77-81

[7] 闾国年, 钱亚东, 陈钟明. 黄土丘陵沟壑区沟谷网络自动制图技术研究[J]. 测绘学报, 1998, 27(2):131-137

[8] 邵骏, 袁鹏, 李秀峰. 岷江上游年径流变化的多时间尺度分析[J]. 东北水利水电, 2007,6 54-56

（下转第 63 页）

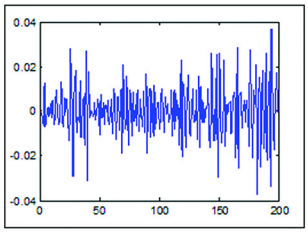

图 7　无周跳的电离层残差值

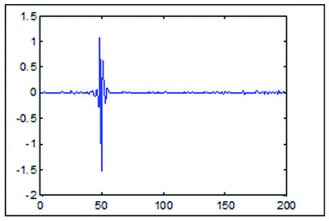

图 8　含周跳的电离层残差值

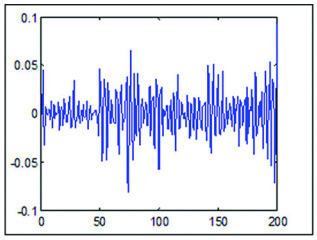

图 9　无周跳双频伪距残差值

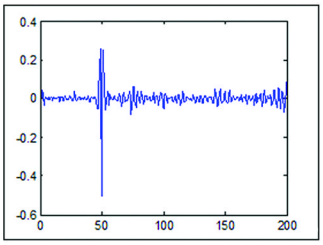

图 10　含周跳后双频伪距残差值

在卫星 PRN5 上第 50 历元的 L_1、L_2 载波上加入相同的周跳值，由图 8、图 10 可以看出，图 8 探测的周跳值比图 10 的值大，说明经过小波处理的无电离层残差探测的周跳值比双频伪距组合观测（Melbourne-Wbbena）探测的好。

4　结　语

首先分析了 GPS 周跳产生的原因及其特性，继而提出了周跳探测的检验量；然后在此基础上，采用小波分析的方法对实测数据进行多方面实验，并与常规方法做了一定地对比，从而说明了小波方法用于 GPS 周跳探测及修复的效果及优点。

参考文献

[1] Collin K,Warnant R. Application of Wavelet Transform for GPS Cycle Slip Correction and Comparison with Kalman Filter [J]. Manuscripta Geodaetiea, 1995,20(3): 161-172

[2] Chris Rizos. Multipath Effects on GPS in Mine Environment[R]. 5th International Congress on the International Society for Mine Surveying, Fremantle ,Australia,1997

[3] 杨元喜. 动态 Kalman 滤波模型误差的影响 [J]. 测绘科学, 2006, 31(1):17-18

[4] 吕伟才, 徐绍铨.Kalman 滤波在似单差方法中的应用 [J]. 测绘通报, 2006, 3:14-17

[5] 刘大杰, 陶本藻.实用测量数据处理方法「M」.北京:测绘出版社, 2000

[6] 余学祥, 吕伟才.抗差卡尔曼滤波模型及其在GPS监测网中的应用[J].测绘学报, 2001, 30(l):27-31

[7] 贾沛璋, 吴连大. 单频 GPS 周跳检测与估计算法[J]. 天文学报, 2001, 42 (2) :192-197

[8] 宋文尧, 张牙.卡尔曼滤波[M].北京 :科学出版社, 1991

[9] 刘涛, 曾祥利, 曾军.实用小波分析[M].北京 :国防工业出版社, 2006

[10] Mallat S,Hwang W L. Singularity Detection and Processing with Wavelets [J].IEEE Trans on IT,1992,38(2): 617-643

[11] Donoh D L. Denoising by Soft-thresholding[J]. IEEE Transactions on Information, 1995, 41(3):613-627

[12] 郑丽英, 熊金涛, 李良超,等. 小波边界处理及实时去噪[J]. 雷达科学与技术, 2007, 5 (4) :300-303

[13] 纪跃波, 秦树人, 柏林,等. 有限区间信号边界效应问题的研究[J]. 振动与冲击, 2002, 21 (4) :108-112

[14] 文鸿雁. 基于小波理论的变形分析模型研究[D]. 武汉 :武汉大学, 2004

作者简介：母利娜，硕士，研究方向为 GPS 数据处理。

（上接第 60 页）

[9] United States Geological Survey. Shuttle Radar Topography-Mission Documentation: SRTM Topo. http: / / edcftp. cr. usgs. gov/pub /data / srtm /Documentation /SRTM_Topo. txt. 2003

[10] Strahler A N. Hyp Sometric (area2altitude) Analysis of Erosional Topography[J]. Geological Society of Am Erican B ulletin, 1952, 63: 1117-1142

[11] 周启鸣, 刘学军. 数字地形分析[M]. 北京 :科学出版社, 2006

[12] Martz L W, Garbrecht J. An Outlet Breaching Algorithm for the Treatment of Closed Depressions in a Raster DEM [J].Computers & Geosciences, 1999, 25(6):835-844

第一作者简介 :李旭娇,硕士,研究方向为 3S 技术与数字国土。