

基于RS与GIS技术的数字流域水体信息的提取

杨旭^{1,2}, 陈建国^{1,2}, 程潭武^{1,2}, 刘锐^{1,2}

(1. 中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北武汉 430074)

摘要: 针对DEM的误差及时效性可能会导致提取出的水文要素与实际情况出现偏差的问题, 提出利用遥感信息与DEM综合提取水系的方法。利用遥感影像, 根据NDWI和波段分析相结合的方法提取流域主干河流和面状水域, 并用数学形态学对提取出的二值图进行除噪、细化等处理; 利用DEM数据, 根据流域集水面积阈值与河网密度之间的关系曲线确定临界支撑面积阈值, 并通过叠置运算和邻域分析对伪河道等进行合理剔除。综合两者结果, 设置遥感水系和DEM水系主干河道校正控制点, 并以遥感水系主干河道为基准, 对DEM水系中控制点图层进行配准, 从而完成对DEM水系位置及面状水域的修正。

关键词: 数字高程模型(DEM); 水文要素; 数学形态学; 遥感; 数字流域水系

中图分类号: P237

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)04-0081-06

The extraction of digital watershed water body information based on GIS and RS

YANG Xu^{1,2}, CHEN Jianguo^{1,2}, CHENG Tanwu^{1,2}, LIU Rui^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China; 2. Faculty of Earth Resource, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: The error and timeliness of DEM may cause deviation from the actual situation in the extraction of hydrographic net; therefore, we proposed a method that combining the remote sensing information and DEM to extract hydrographic net. This method uses remote sensing image to extract the main stream of the drainages based on NDWI and spectral analysis, and the way of mathematical morphology is employed to remove the noise and refinement of the proposed binary graph. Based on the DEM extraction of river network, the water area threshold of the river net is determined by the relationship between the water area threshold and the density of the river network, and the pseudo-channel is eliminated rationally. Remote sensing system and DEM main water system channel correction control points should be set based on both results. The control points in the DEM water system layer should be rectificated with the RS main water system channel, so as to complete the DEM water system location and correction of planar waters.

Key words: digital elevation model (DEM); hydrological elements; mathematical morphology; remote sensing; digital watershed system

1 研究背景

随着空间信息技术的不断发展, 利用数字高程模型DEM提取流域水系已经成为水系提取方法中热议的话题, 同时利用遥感影像提取多时相、多尺度

的水系也已经被广泛应用, 如可以结合不同季节影像, 进一步识别时令河与常年河等信息。由于二者在水系提取上存在缺陷, 因此如何更为准确高效地提取水系仍是有待研究的问题^[1]。

随着GIS技术的发展, 基于DEM提取水文要素

收稿日期: 2018-03-13; 修回日期: 2018-04-05

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFC0601504); 国土资源公益性行业专项(201511079-02)

作者简介: 杨旭(1994-), 男, 安徽淮南人, 硕士研究生, 主要从事资源勘查、地学信息处理等方面的研究。

通讯作者: 陈建国(1964-), 男, 浙江宁波人, 博士, 教授, 硕士生导师, 从事地球探测与信息技术、GIS应用与三维地学建模等方面的研究。

在 O'Callaghan 等^[2]和 Tribe^[3]提出的传统理论上得以快速发展。谢顺平等^[4]在传统 DEM 水系提取的基础上提出了面向分布式水文过程模拟和流域特征提取的数字水系模型,对复杂地形中所存在的洼地有效处理^[5-7]使得对各洼地的填平一次完成。Martz 等^[8]提出了数字高程流域水系模型(DEDNM)用来表征地表水流特征,并能为计算栅格水流方向、流域分水线等提供依据。在此思想的基础上,熊立华等^[9]总结了根据流域的数字高程模型自动提取河网水系^[10]的集水面积方法,并分析了临界支撑面积^[11-12]的取值对所提取的数字水系总长度以及平均坡降的影响。基于 DEM 不能准确提取面状水系的问题,Turcotte 等^[13]在 DEM 的基础上通过输入数字河流和湖泊网络(DRLN)来改善对湖泊和平原的处理能力。Hutchinson^[14]提出并由 Yamazaki 等^[15]改进的利用提取出的矢量河道与原始 DEM 进行叠加从而达到降低河道所在 DEM 高程,使得提取出的河网与实际水系相近。该方法虽然简单高效,但在河道与河岸边界之间容易产生不确定性高差。

目前基于遥感影像提取水体常用的方法主要有:多波段谱间结构关系法^[16]、水体指数法^[17]、决策树法^[18]、监督分类法^[19]以及归一化差异性水体指数 $NDWI$ ^[20]等,其中 $NDWI$ 的应用最为广泛。徐涵秋^[21]对构成指数的波长组合进行了修改,提出了改进的归一化差异水体指数 $MNDWI$,但由于 $MNDWI$ 的构成采用了中红外波段,因此不适用于无中红外波段的传感器影像。为了提高遥感水系的提取精度^[22],Bhandari 等^[23]提出了一种利用归一化植被指数($NDVI$)和归一化水体指数($NDWI$)进行离散小波变换(DWT)和奇异值分解(SVD)的增强方法。

为了提高从空间数据中提取水系的精度,使得提取的水系分布与实际情况更加符合,使用 $NDWI$ 和波段分析相结合的方法来提取面状水域和干流,并使用数学形态学^[24-25]对提出的二值图进行除噪、细化等处理。通过 DEM 提取河网时,通过分析流域集水面积阈值与河网密度之间的关系确定河网集水面积阈值并对伪河道等进行合理剔除。最后以遥感影像提取出的干流为依据设置校正控制点,对 DEM 河网中水体的位置及面状水域进行修正,从而完成最终流域水系的提取。

2 数字流域水系综合提取思路

基于 DEM 与遥感信息的数字流域水系提取时技术路线图如图 1,其主要内容如下:

(1)对遥感影像进行校正、裁剪等预处理,并采用决策树的方法提取出主干河道和面状水域,并利用数学形态学中膨胀、腐蚀、击中、边缘提取及细化等运算方法将提取的水体结果进行断线连接、去噪及细化等处理,从而得到连续的河网;

(2)基于 DEM 提取河网,在对原始 DEM 数据进行填洼等预处理后,结合流域集水面积阈值与河网密度之间的关系确定河网集水面积阈值,并通过矢量水系运用叠置运算和邻域分析等方法对提出的伪河道进行合理剔除;

(3)将遥感影像和 DEM 在提取水系的优点进行互补,综合遥感水系信息与 DEM 水系信息,并将两者水系进行叠加。以遥感影像提取出的主干河流和面状水域为依据,修正 DEM 提取中主干河道以及缺失的面状水域,从而完成对研究区水系的提取。

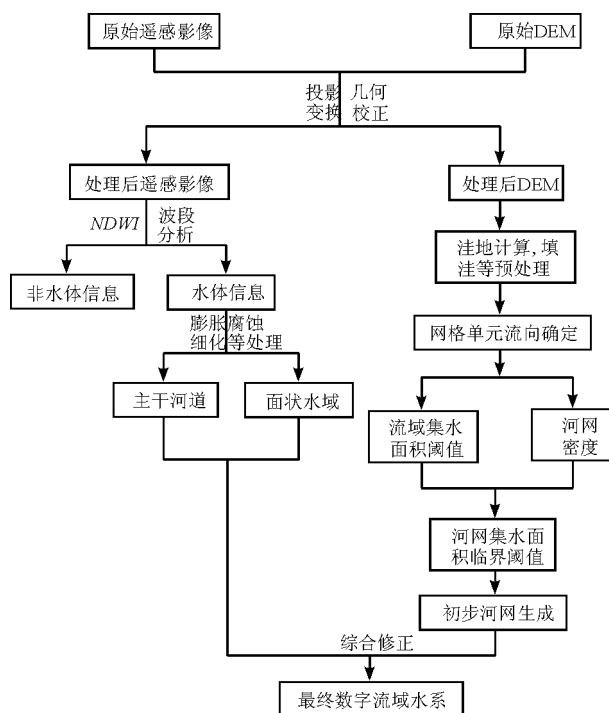


图 1 数字流域水系综合提取技术路线图

3 数字流域水系综合提取方法

3.1 遥感水系信息的提取

本研究区选取沧源流域,使用的是高分一号影像,拍摄于 2015 年 2 月 6 日。对高分遥感影像数据首先进行正射校正、图像裁剪等图像预处理,然后对遥感影像进行水系提取(见图 2)。

首先采用归一化差异水体指数($NDWI$)^[26]对本研究区遥感影像进行水系提取,归一化差异水体指数:

$$NDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{Nir}}{\rho_{Green} + \rho_{Nir}} \tag{1}$$

式中： ρ_{Green} 为绿色光波,在遥感影像中为第 2 波段； ρ_{Nir} 为近红外光波,在遥感影像中为第 4 波段。

由于通过 $NDWI$ 运算后,水体的值会很低,而其他地物的值会很高^[27],因此可以通过设置水体提取阈值完成对水系的初步提取,经过反复实验,选取水系提取阈值为 0.1。但实际上通过 $NDWI$ 提取后的水系图上还夹杂着地物、阴影和细小水体等噪声^[28] (图 3)。

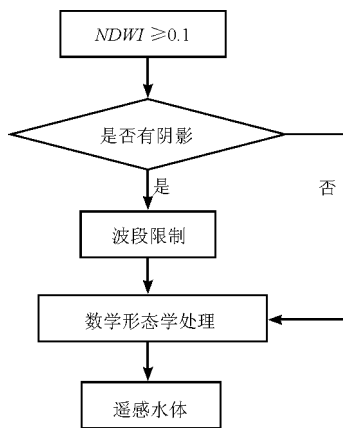


图 2 遥感影像水体提取路线图

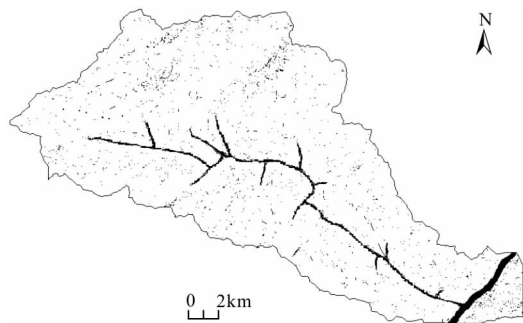


图 3 沧源流域基于 $NDWI$ 提取的水系图

然后利用波段分析方法,通过设置限制性条件去除无用的噪声。首先对 4 个波段的亮度直方图进行统计(表 1)。

表 1 研究区 4 个波段统计特征表 m				
波段	最小值	最大值	平均值	标准差
Band 1	0	4633	235.47014	326.489
Band 2	0	5826	309.46165	402.3791
Band 3	0	6438	308.54362	423.5193
Band 4	0	14150	1309.8637	1513

由表 1 可知,Band 4 的标准差最大,表明该波段内地物的亮度取值距均值的离散程度最大,即地物

间的差异表现最大,信息量最大。因此可以作为设置限制性条件从而剔除无用数据的最优波段。经过多次实验,认为阈值设定为 1100 时剔除阴影等噪声的效果最佳,见图 4。由图 4 可看出,其虽然提取出了水系的基本轮廓,但仍旧存在少量阴影及水系断线,从而造成提取的水系不连续的现象。

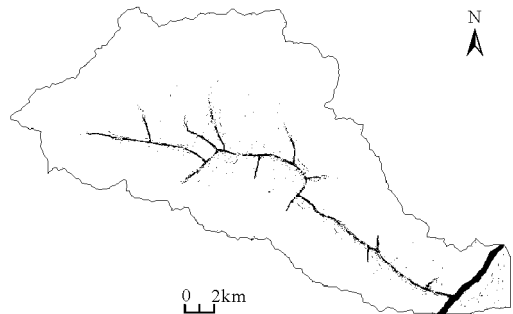


图 4 沧源流域基于 $NDWI$ 和波段分析提取的水系图

基于二值图图 4 中出现的水系不连续以及有噪声的情况,采用数学形态学的方法对提取出的二值图进行改进处理。数学形态学基本运算主要有膨胀和腐蚀:

膨胀运算:

$$A \oplus B = \{z | (\hat{B})_z \cap A \neq \phi\} \tag{2}$$

腐蚀运算:

$$A \ominus B = \{x | (B)_x \subseteq A\} \tag{3}$$

式中: A 为待处理图像; B 为结构元素; z 为 B 的映射位移; x 为 B 的位移。

以上两种形态学基本运算可以派生出击中运算、边界提取及细化处理运算:

击中运算:

$$A \otimes B = (A \ominus B_1) \cap (A^c \ominus B_2) \tag{4}$$

其中 $B = (B_1, B_2)$

边界提取:

$$C(A) = A - (A \ominus B) \tag{5}$$

细化处理:

$$C(A) = A - (A \otimes B) \tag{6}$$

式中: $C(A)$ 为处理后图像; A^c 为 A 的补集。

基于以上数学形态学运算,对水系二值图像进行膨胀处理,从而实现对断线水系进行连接,从而形成连续水系;然后对膨胀后的图像进行腐蚀处理,从而实现对图中噪声的剔除,同时在剔除噪声后还可以很好地保持水系轮廓;再对腐蚀处理后的图像进行细化处理,使得提取出的水系更为平滑,最终将处理后的二值图进行边缘检测处理,得出最终的遥感水系图,如图 5。

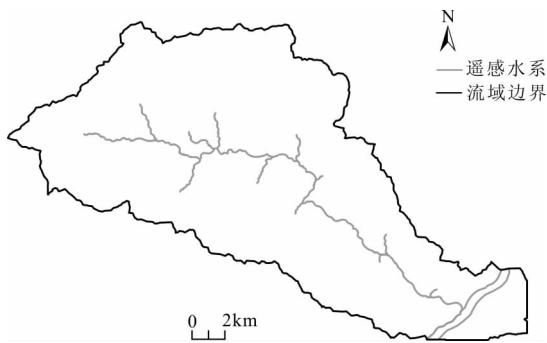


图5 沧源流域基于数学形态学处理后的水系图

3.2 基于 DEM 数字流域水系信息的提取

对于研究区 ASTER DEM, 首先需要对 DEM 中的洼地、平坦区进行预处理, 处理流程见图 6。其主要步骤为: (1) 计算栅格 DEM 中的水流流向栅格; (2) 通过汇运算判定 DEM 中是否存在水流流向栅格的异常值, 即判断是否存在洼地、平坦地区等; (3) 对栅格 DEM 中的洼地进行填洼平滑等预处理; (4) 再次计算填洼后 DEM 中每个网格单元的水流方向。

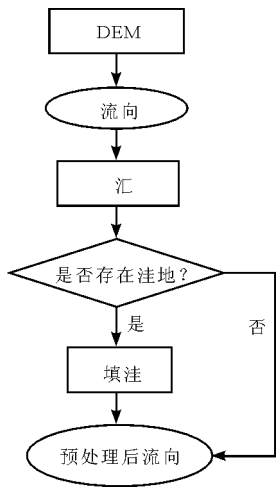


图6 DEM 预处理流程图

通过以上对 DEM 进行预处理的步骤后, 需要进一步计算基于单元网格方向的流量, 即计算每个网格单元的上游汇集水流面积。继而通过设置集水面积阈值完成对流域河网水系的提取。本研究区主要位于沟壑区, 可以认为河道起源于坡面由凸向凹的转变^[29], 随着阈值的增加, 河道的变化也会趋于平缓, 因此可以通过河网密度与集水面积阈值之间的关系(见表 2)进行曲线拟合确定合理的集水面积阈值。图 7 为集水面积阈值与河网密度及其一阶导数的关系曲线, 由图 7(a)可知: 随着流域集水面积阈值的增加, 河网密度持续递减, 由于图 7(a)的其临

界转折点变化并不显著, 因此作出其一阶导数曲线图 7(b), 在集水面积阈值设置大约为 165 km² 时表现为曲线递减变缓的转折点, 即认为 165 km² 是坡面由凸向凹转变的转折点, 也是该区域较为合理的流域集水阈值。

表 2 研究区集水面积阈值与河网密度关系表

集水面积阈值/ km ²	河网密度/ (km · km ⁻²)	河网密度一阶 导数/km ⁻²
65	2.70	-0.071
85	2.20	-0.037
105	1.70	-0.022
125	1.30	-0.014
145	1.00	-0.010
165	0.80	-0.007
185	0.70	-0.005
205	0.61	-0.004
225	0.52	-0.003
245	0.43	-0.003
265	0.36	-0.002

该流域地势较陡, 伪河道较少, 但在下游出口处支流上可能存在伪河道, 如图 8(a)。由于伪河道只存在于支流中, 因此不考虑主流, 此时可将支流河道 DEM 与原始 DEM 进行叠置运算, 从而得到支流河道的高程, 再对支流河道进行领域分析, 即如果是位于平坦区的伪河道, 其支流高程与邻域单元高程差别较小, 从而做出伪河道在支流中所在位置并剔除, 从而得到图 8(b)。

4 基于 DEM 与遥感信息数字流域水系的综合提取

通过 DEM 提取水系时, 只能提取河网, 不能对面状水域进行精确地提取, 并可能在面状水域的存在的地方出现异常(图 9(a)); 在通过遥感影像进行水系提取时, 只能提取水系的主干河道以及面状水域, 对于细小水系并不能很好地提取。

利用 DEM 数据根据沟谷提取水系, 对细小水系更为敏感; 遥感影像主要根据水系在波段中的特征识别水系, 对大面积水域更为敏感, 综合二者在水系提取上的优点进行互补。由于遥感影像提取出的主干河流和面状水系较为准确, 因此以遥感影像提取出的主干河流和面状水域为依据, 对 DEM 提取出的水系进行修正。首先以遥感水系和 DEM 水系信息

中分别以主干河道为基准,在河道转弯处设置校正控制点,然后以遥感水系为基准对 DEM 水系中控制点图层进行配准,完成对 DEM 主干河流的修正,即完成模拟地表径流从沿岸流向主干河道,以确保

DEM 河网水系的主干河道与实际相符;在面状水系处,综合遥感水体信息,剔除 DEM 水系位于面状水系处的异常,从而最终完成对研究区水系的提取(图 9(b))。

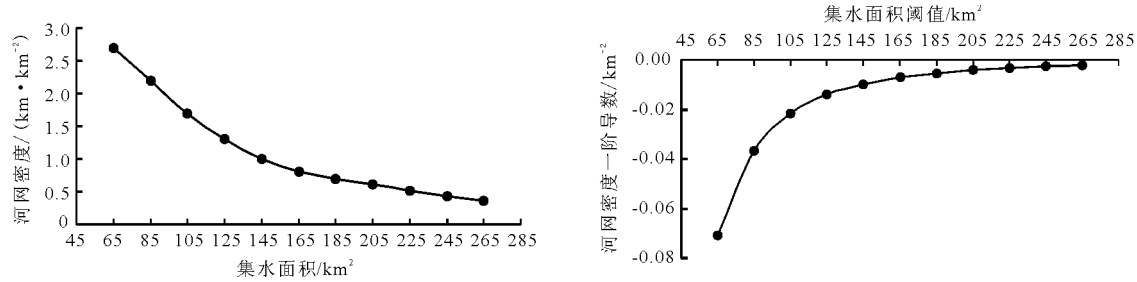


图 7 集水面积阈值与河网密度及其一阶导数关系曲线图

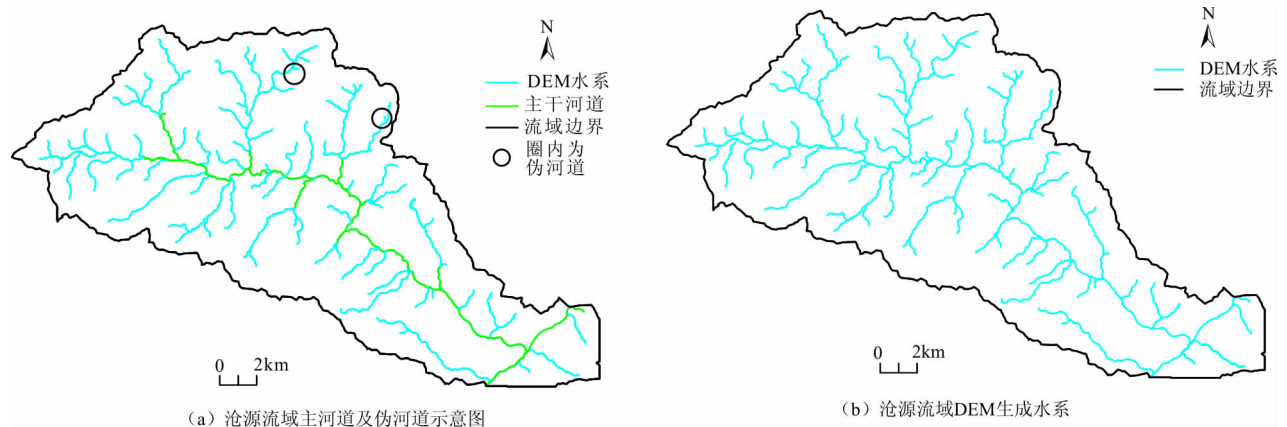


图 8 基于 DEM 生成的水系

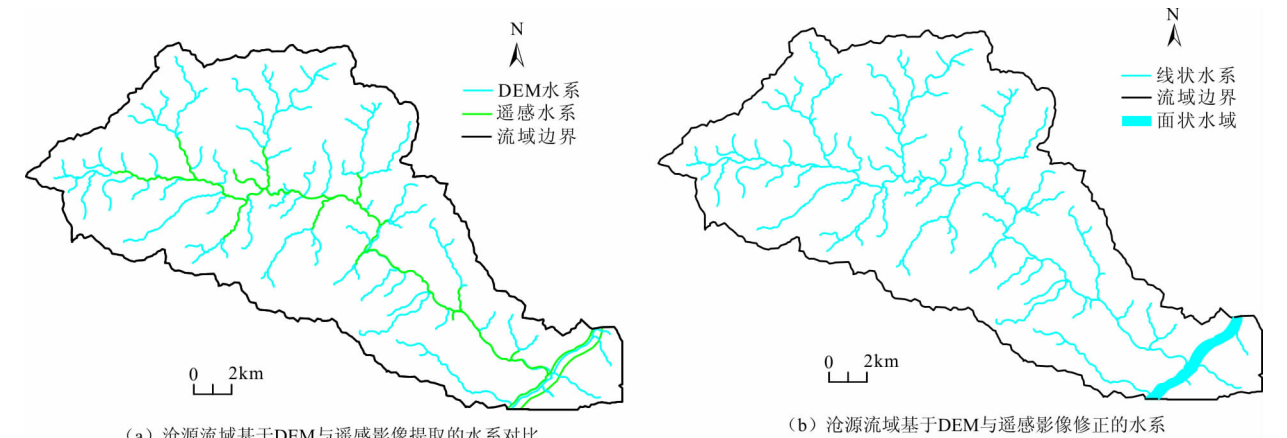


图 9 基于 DEM 与遥感影像提取的水系

5 结 论

- (1) 基于遥感影像提取水系时将波段运算作为 NDWI 的限制条件,同时利用数学形态学的方法对提取出的水系二值图进行连接、去噪、边缘检测等处理,从而实现对遥感影像中水系的提取。
- (2) 对基于 DEM 数字高程提取水文要素的方

法进行改进,通过流域集水面积阈值与河网密度之间的关系确定河网集水面积阈值,并通过叠置运算和邻域分析对伪河道和过短支流进行合理剔除。

(3) 基于 DEM 与遥感信息方法对数字流域水系进行提取,二者可以相互弥补各自在水系提取中的缺陷,从而使得提取出的成果可以较为准确地反映研究区水系的实际分布情况。通过与研究区地质

底图中的水系图进行对比,结果较为准确,从而表明采用该方法提取水文要素是合理、可行的。

参考文献:

- [1] 许捍卫,何江,余远见. 基于 DEM 与遥感信息的秦淮河流域数字水系提取方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, 36(4): 443-447.
- [2] 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(28): 323-344.
- [3] 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, 1995, 167(s 1-4): 393-396.
- [4] 谢顺平,都金康,罗维佳,等. 基于 DEM 的复杂地形流域特征提取[J]. 地理研究, 2006, 25(1): 96-102 + 187.
- [5] 马玲,杨武年,郑富强,等. 基于 DEM 的流域特征提取方法初步研究[J]. 地理空间信息, 2008, 6(2): 69-71.
- [6] 王建平,任立良,吴益. 一种新的 DEM 填洼处理算法[J]. 地球信息科学, 2005, 7(3): 51-54.
- [7] 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.
- [8] MARTZ L W, GARBRECHT J. Numerical definition of drainage network and subcatchment areas from Digital Elevation Models [J]. Computers & Geosciences, 1992, 18(6): 747-761.
- [9] 熊立华,郭生练. 基于 DEM 的数字河网生成方法的探讨[J]. 长江科学院院报, 2003, 20(4): 14-17.
- [10] GARTSMAN B I, SHEKMAN E A. Potential of river network modeling based on GIS technologies and digital elevation model [J]. Russian Meteorology & Hydrology, 2016, 41(1): 63-71.
- [11] 朱宝山,张绍华,徐大龙,等. 综合水体指数及其应用[J]. 测绘科学技术学报, 2013, 30(1): 19-23.
- [12] 任立良. 长江三峡区间数字流域水系的构建[J]. 长江流域资源与环境, 2001, 10(1): 43-50.
- [13] TURCOTTE R, FORTIN J P, ROUSSEAU A N, et al. Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network[J]. Journal of Hydrology, 2001, 240(4): 225-242.
- [14] HUTCHINSON M F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits [J]. Journal of Hydrology, 1989, 106(3-4): 211-232.
- [15] DAI Y, BAUGH C A, BATES P D, et al. Adjustment of a spaceborne DEM for use in floodplain hydrodynamic modeling [J]. Journal of Hydrology, 2012, 436-437: 81-91.
- [16] 汪金花,张永彬,孔改红. 谱间关系法在水体特征提取中的应用[J]. 矿山测量, 2004(4): 30-32.
- [17] 赵紫薇. 基于 OSTU 算法利用新型水体指数进行 Landsat 数据自适应阈值水体自动提取研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(9): 57-60.
- [18] 李正云,刘艳伟,王海星. 基于决策树方法的杨凌示范区水体提取分析[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(6): 133-135.
- [19] 姜玲. 基于遥感和数据的柬埔寨洞里萨湖地区数字地貌制图研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2008.
- [20] 陈文倩,丁建丽,李艳华,等. 基于国产 GF-1 遥感影像的水体提取方法[J]. 资源科学, 2015, 37(6): 1166-1172.
- [21] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.
- [22] 林凯荣,郭生练,陈华,等. 利用遥感信息修正数字河网的研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(6): 48-52.
- [23] BHANDARI A K, KUMAR A, SINGH G K. Improved feature extraction scheme for satellite images using NDVI and NDWI technique based on DWT and SVD [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(9): 6949-6966.
- [24] 翟辉琴,王明孝,张保明,等. 一种利用数学形态学提取遥感影像水域的方法[J]. 遥感信息, 2005(1): 18-20 + 23.
- [25] SOILLE P. 形态学图像分析原理与应用: 第2版[M]. 王小鹏,等译. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [26] 马延辉,林辉,孙华,等. 基于 CIWI 模型的水体信息提取研究[J]. 中国水土保持, 2009(5): 41-43.
- [27] 汤国安,赵牡丹,杨昕,等. 地理信息系统: 第二版[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [28] 于德浩,龙凡,邓正栋,等. 基于遥感特征指数的地表水体自动提取技术研究[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(2): 707-713.
- [29] 汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006.