

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.004>



基于 DEM 和高分辨率遥感影像的“膨胀—融合”式地表沟壑提取

李文凯¹, 张 唯¹, 秦家豪², 王红平^{1*}

1. 中国地质大学地理与信息工程学院, 湖北武汉 430078
2. 中国建筑第二工程局有限公司上海分公司, 上海 200135

摘 要: 地表沟壑的精细化提取是地形地貌特征的重要内容. 针对现有沟壑提取结果中存在断裂区域和伪沟壑区域的情况, 提出一种基于 DEM 和高分辨率遥感影像的地表沟壑“膨胀—融合”式提取方法. 该方法综合了 D8 算法、坡向变率算法和面向对象分类方法的提取结果, 首先引入距离制图算法对初始沟壑进行方向性膨胀, 然后通过栅格重分类和代数运算进行沟壑融合, 剔除伪沟壑区域, 最终实现研究区域内沟壑的精细化提取. 以 GDEM v2 数据和高分二号影像数据为数据源, 精细化提取了湖北省神农架林区举黑沟至麻湾村一带的地表沟壑. 采用随机点验证法对实验区域内的沟壑提取结果进行了精度评价, 结果表明该方法的总体精度为 92%, 能有效弥合数据中的断裂区域, 同时剔除伪沟壑区域, 达到提高沟壑提取精度的目的.

关键词: 地表沟壑提取; 水文分析; 坡向变率; 面向对象分类; 高分辨率遥感影像.

中图分类号: P208

文章编号: 1000-2383(2020)06-1948-08

收稿日期: 2019-09-30

“Expansion-Fusion” Extraction of Surface Gully Area Based on DEM and High-Resolution Remote Sensing Images

Li Wenkai¹, Zhang Wei¹, Qin Jiahao², Wang Hongping^{1*}

1. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China

2. China Construction Second Engineering Bureau Ltd. East China Company, Shanghai 200135, China

Abstract: Refined extraction of surface gullies is an important part of topography research. Aiming at the existence of fracture zones and a pseudo-gully zones in the existing gully extraction results, in this paper, it proposes an “expansion-fusion” extraction method based on DEM and high-resolution remote sensing image. The method combines the D8 algorithm, the SOA (slope of aspect) algorithm and the object-oriented classification method to extract the results. Firstly, the distance mapping algorithm is introduced to directional expansion of the initial gully, and then the raster re-classification and algebraic operation are used to merge the gully and eliminate the pseudo-gully. In this study, this method is adopted to extract gully area with GDEM v2 data and GF-2 data covering the area of Juheigou to Mawancun in Shennongjia Forest of Hubei Province. The random point verification method is used to evaluate the accuracy of the gully extraction in the experimental area. The results show that the overall accuracy of the method is 92%, which can effectively bridge the fracture area in the combined data, and eliminate the pseudo-gully area to improve the extraction accuracy of the gully.

Key words: surface gully extraction; hydrological analysis; SOA (slope of aspect); object-oriented classification; high-resolution remote sensing image.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41501584); 国家自然科学基金项目(No.41871304).

作者简介: 李文凯(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事数字地形分析研究. ORCID: 0000-0003-2266-8477. E-mail: 20151003928@cug.edu.cn

* 通讯作者: 王红平, E-mail: wanghp@cug.edu.cn

引用格式: 李文凯, 张唯, 秦家豪, 等, 2020. 基于 DEM 和高分辨率遥感影像的“膨胀—融合”式地表沟壑提取. 地球科学, 45(6):1948-1955.

0 引言

沟壑是河流地表侵蚀所形成的一种特殊地貌结构(Prosser and Slade, 1994). 准确地定位并提取沟壑的分布信息对水土保持、城市规划布局以及地质结构演变等研究领域都具有重要的意义. 因此, 沟壑的提取是环境保护、城市决策和地质工程等领域的重要工作内容之一.

随着数字水文的发展, 数字地面模型(DEM)因具有明确的物理意义, 并能较好地模拟真实地形表面特征(Wood, 1996), 受到了许多研究者的关注, 出现了多种有效的地表沟壑提取算法. 根据沟壑提取原理的区别, 可将算法分为基于数学形态学和基于水文学原理这两类. 基于数学形态学的方法是利用DEM的网格坡面和其他地形信息来计算沟壑, 如利用平面曲率和坡位组合来计算沟壑的“坡向变率法”(汤国安等, 2010). 基于水文学原理的算法也称坡面径流模拟算法(O'callaghan and Mark, 1984), 其原理是利用水文分析, 将潜在水流视为地表沟壑.

除了上述两类算法之外, 还有诸如等高线曲率最大判别法(刘学军等, 2008)、等高线骨架化法等算法在流域提取、地形探测等领域都有广泛的应用(陈婷等, 2011). 上述方法在沟壑提取过程中难免会出现平行沟壑, 线状提取结果无法呈现沟壑的具体形状、深浅、宽度诸多特征等问题(朱长明等, 2013).

在20世纪70年代, 有专家学者发现应用遥感影像提取的沟壑结果, 可以避免基于DEM数据提取沟壑时出现的诸多问题(Band, 1986). 吴良超(2005)提出的利用GIS-RS技术来定位沟壑提取区域的方法也一度成为研究热点. 由于受影像分辨率的限制, 提取精度普遍不高. 如Knight *et al.* (2007)利用Aster影像提取了热带河流形成的冲积沟, 提取精度仅为50%. 随着高空间分辨率卫星的普及, 许多学者也开展了利用面向对象分类技术提取沟壑的研究. Rajesh利用面向对象技术, 结合光谱、形状、地形等信息, 在摩洛哥台地平缓地区的IKO-NOS和GEOEYE-1影像上提取了沟壑地形, 取得了令人满意的提取精度(Rajesh *et al.*, 2011). 李斌兵和黄磊(2013)采用面向对象分类技术在甘肃省天水市黄土丘陵沟壑区的WorldView-2影像上提取了切沟沟壑, 总体精度达75.17%. 然而, 由于高分辨率影像存在严重的“同物异谱、同谱异物”现象(柳潇等, 2020), 利用面向对象技术提取沟壑时, 往往

会造成提取结果的不连续性.

鉴于上述问题, 本文提出一种“膨胀—融合”式沟壑提取方法, 结合栅格空间分析方法和影像分类方法的优势, 在利用DEM数据和高分辨率遥感影像数据提取沟壑的基础上, 对初始沟壑结果进行方向性膨胀和地图代数融合, 进而得到完整的地表沟壑信息.

1 “膨胀—融合”式沟壑提取方法

在数字高程模型中, 地形特征信息以高程值的形式被储存在栅格格网中, 使得DEM能够很好的模拟地表起伏程度, 为基于DEM提取沟壑提供了理论依据(黄小巾等, 2018). 在高分辨率遥感影像上, 各种地物既有光谱信息, 还有丰富的纹理信息, 这为利用面向对象技术来提取沟壑提供了可能.

本文在传统的坡面径流模拟算法和坡向变率方法提取地表沟谷线的基础上, 综合考虑了面向对象技术提取沟壑区域的可行性. 采用基于距离分析的沟壑膨胀方法弥补了沟壑提取过程中的断裂区域, 使用基于栅格空间分析的沟壑细化方法剔除了结果中存在的伪沟谷区域. 整体流程如下.

1.1 基于DEM提取沟谷线

本文采用基于坡面径流模拟算法的D8算法(O'callaghan and Mark, 1984)和基于数学形态学算法的坡向变率算法提取沟谷线.

D8算法利用自然水流因重力作用从高处向低处汇流的自然客观规律, 模拟地形表面水流的运动路径来构建区域内各个像元的汇水能力(汇流累积量). 以汇流累积量大于一定阈值的汇水路径作为该区域的沟谷线(张唯等, 2016). 其方法流程如下: 首先通过填洼处理确保DEM中没有内部的凹陷点; 然后计算无洼地DEM上每个栅格单元的水流流向; 同时假定每个栅格单元所携带的初始流量值都为1, 结合流向计算每个栅格像元的汇流累积值; 最后通过设置集水面积阈值, 提取汇流累积量大于阈值的栅格单元作为沟谷网络.

坡向变率是反映地形在水平方向上变化特征的关键指标(谢轶群等, 2013). 坡向变率算法提取沟谷网络的原理是通过找出低于平均高程的地形(也称负地形)表面上坡向在水平方向上变化率高于某一阈值的点, 这些点即组成地形表面上的沟谷线(汤国安等, 2010). 该方法在计算坡向时, 由于无法平滑的表示正北方向上从360度到0度的变化情况.

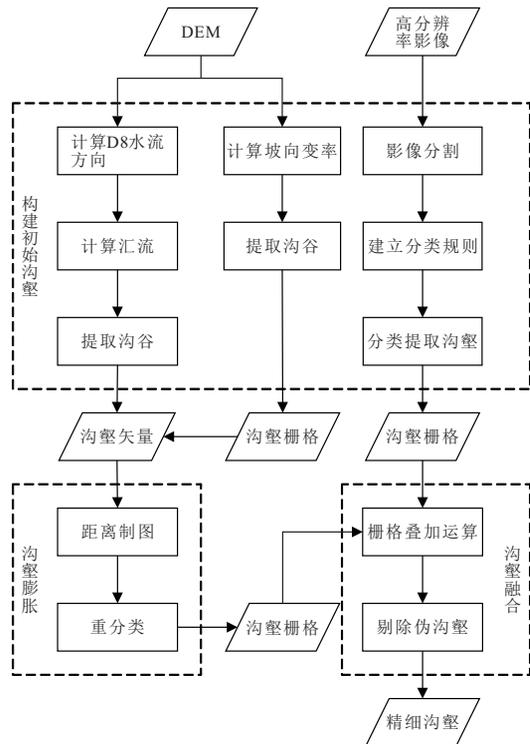


图1 基于DEM和高分辨率遥感影像的“膨胀-融合”地表沟壑提取方法总体流程

Fig.1 The flow chart of surface gully “expansion-fusion” extraction method based on DEM and high-resolution remote sensing image

因此本文采用正负地形相减的方法消除坡度数据中存在的正北方向误差,算法公式(1)如下。

$$SOA = \frac{([SOA1] + [SOA2]) - \text{Abs}([SOA1] - [SOA2])}{2}, \quad (1)$$

(1)式中,SOA是无误差DEM数据的坡向变率值,SOA1是正地形下的坡度,SOA2是负地形下的坡度。

1.2 基于遥感影像提取沟壑

采用面向对象分类的地表沟壑提取方法,能更好地保留沟壑的细部特征,主要流程包括分割、分类和提取3个步骤。

首先是对目标影像进行分割,以形成初始的、较为同质的图像对象或图斑。图像分割的目的在于减少同类地物的光谱差异,增大不同类地物的光谱差异,提高遥感影像的信噪比,增强遥感影像的可分性(王伟超和邹维宝,2013)。然后根据图斑的光谱特征和纹理特征,制定相关分类指标,并计算不同地物在分类指标上的取值范围。分类指标要能够很好地描述归属于不同地物类别的图像对象之间的

差异,分类规则要体现不同地物的可区分性。最后严格按照该分类规则选择合适的样本并执行面向对象分类提取沟壑(金飞,2013)。

1.3 多源沟壑数据的膨胀与融合

对D8算法、坡向变率算法和面向对象分类方法提取的3种沟壑结果,采取先膨胀,后融合的策略,逐步生成精细化的地表沟壑数据。具体算法流程如下。

(1)以D8算法生成的矢量沟壑为中心,采用距离制图算法,生成膨胀沟壑数据,基准空间分辨率与遥感影像空间分辨率一致。

(2)根据距离沟壑中心线的远近,对膨胀的沟壑像元重分类,将距离值在1倍DEM网格间距内的沟壑像元值置为1,其余像元值置为0。

(3)将重分类结果与其他沟壑结果依次进行栅格叠加,提取灰度值满足条件的像元。合并后栅格灰度值分为4类分别是0、1、2、3;最后遍历判断每个像元的灰度值大小,灰度值大于1的像元被认为是真实沟壑区域,灰度值小于或等于1的像元被认为是伪沟壑区域。筛选提取灰度值大于1的像元即组成了侵蚀细化后的真实地表沟壑区域。

1.4 精度评价

为验证本文提出的“膨胀-融合”式沟壑提取方法的识别精度,本文采取目视判别法和随机点验证法来进行评价。

在整个研究区域随机取一定数量的点,定义非沟壑提取精度 ρ_1 、沟壑提取精度 ρ_2 和整体精度 ρ_3 三个评价指标。计算公式如下:

$$\rho_1 = \frac{a1}{b1}, \quad (2)$$

$$\rho_2 = \frac{a2}{b2}, \quad (3)$$

$$\rho_3 = \frac{a1 + a2}{b1 + b2}, \quad (4)$$

式(2)~(4)中 $b1$ 表示落在地表真实非沟壑区域的点数量, $a1$ 表示该区域内被识别为非沟壑的点数量; $b2$ 表示落在地表真实沟壑区域的点数量, $a2$ 表示该区域内被识别为沟壑的点数量。

2 实验及结果分析

为验证本文提出的“膨胀-融合”式沟壑提取方法的有效性,实验选取湖北省西部神农架林区举黑沟至麻湾村一带作为研究区,经纬度范围为东经 $110^{\circ}37'5'' \sim 110^{\circ}41'7''$ 、北纬 $31^{\circ}46'42'' \sim 31^{\circ}49'44''$,如

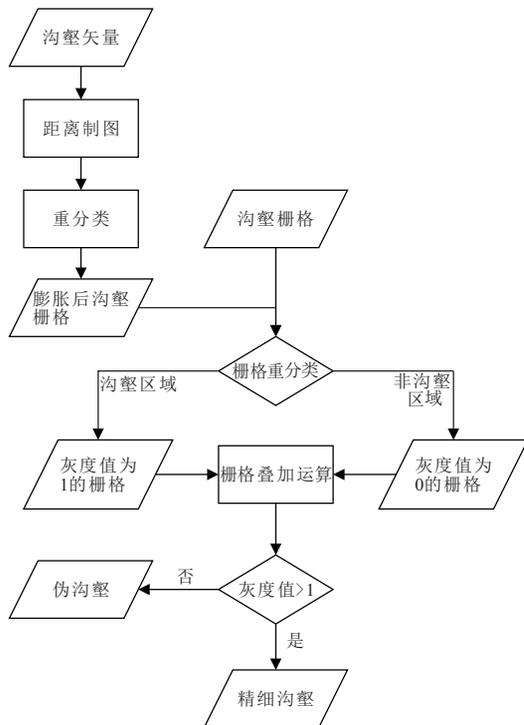


图 2 多源沟壑数据的膨胀与融合方法流程图

Fig.2 The flow chart of expansion and fusion method of multi-source gully data

图 3a 所示.研究区位于鄂西北边陲地区,属于江南丘陵沟壑区,该地区残留有冰川地貌,致使该地区地貌复杂多变,沟壑纵横.本文采用的 DEM 数据来源于地理空间数据云网站 (<http://www.gscloud.cn/>) 的 ASTER GDEM v2 产品数据,空间分辨率约为 30 m. 高分辨率遥感影像数据来源于遥感集市网站 (<http://www.rscloudmart.com/>) 的高分二号数据,包含全色、蓝、绿、红、近红外 5 个波段,其中全色波段空间分辨率约为 1 m,其余 4 个波段空间分辨率约为 4 m.

2.1 D8 算法提取沟谷线

采用 ArcGIS 水文分析模块提供的 D8 算法提取该研究区域的沟谷线分布情况,先通过填洼算法对该研究区的 DEM 数据进行填洼处理,然后计算坡向,在坡向的基础上计算该区域的汇流累积量 (Martz and de Jong, 1988). 在叠加地表真实影像作为参考依据后,设置 1 000~500 的阈值范围,以 50 为间距,提取不同梯度汇流阈值下的沟谷线,综合判断沟谷线与真实地表地貌的符合程度,选定 600 作为汇流阈值.提取结果如图 3b.

2.2 坡向变率算法提取沟谷线

坡向变率算法与 D8 算法的区别在于划分 DEM

坡向类数的不同,其算法流程如下.

首先利用正负地形相减的方法计算得到该研究区域无误差的坡向变率数据;然后用坡向变率数据与原始 DEM 的负地形数据做交集获取沟谷网络数据,其中根据试错法原理,设置 40~60 的 SOA 阈值区间,以 5 的阈值间隔分别计算不同 SOA 阈值下的栅格沟谷数据,通过叠加底图显示最终获得该区域的最佳坡向变率阈值为 55;将栅格沟谷数据通过栅格转矢量算法转换为矢量沟谷线以消除部分孤立的伪沟壑像元.最终提取结果如图 3c 所示.

2.3 面向对象分类方法提取沟壑

面向对象分类技术所处理的遥感影像最小单元是由包含语义信息的多个像元集合所组成的 (曹宝等, 2006). 为了突出影像上的语义信息,需要先对遥感影像进行分割.影像分割就是在某一尺度下将遥感影像分成许若干个富含语义信息的图斑.本文使用 eCognition 软件实现影像分割,参与分割的图层有红、绿、蓝以及 NDVI 四个图层,各图层权重比值为 1:1:1:1,尺度参数 (scale parameter) 设置为 25,形状参数 (shape parameter) 设置为 0.1,光滑度参数 (compactness parameter) 设置为 0.3.

影像分割后的图斑不仅有中低分辨率影像所具有的光谱特征,还有中低分辨率上无法很好表达的地形、形状、纹理特征 (侯群等, 2013). 对研究区遥感影像目视解译发现,神农架林区举黑沟至麻湾村一带主要包含林地、道路、沟壑、耕地 4 类地物.其中林地图斑由于植被覆盖率较大,具有很高的 NDVI 值;且其坡度通常不会较大以适宜林木的生长.道路图斑有着特殊的形状结构,因此长宽比一般较大,且方向性很强;由于道路图斑植被覆盖率较低,NDVI 值一般较小.沟壑图斑除了有比较强的方向性外,同时地形起伏变化也较大,因此坡度一般较大.耕地图斑一般覆盖有中低密度的植被,NDVI 值也较高,同时该类地区通常地势较为平缓以适宜农作物的生长,因此坡度较小.基于上述分析建立如表 1 分类规则.

按照上述分类规则选取一定数量的分类样本后执行分类,获得了该区域的分类结果如图 4b.

2.4 沟壑区域融合

由于 D8 算法和坡向变率算法所提取的沟谷线是线矢量,而线矢量数据无法精确描述沟壑的细节部分,且存在部分断裂区域.为了弥合基于数字高程模型提取的沟谷线中存在的部分断裂区域,本文

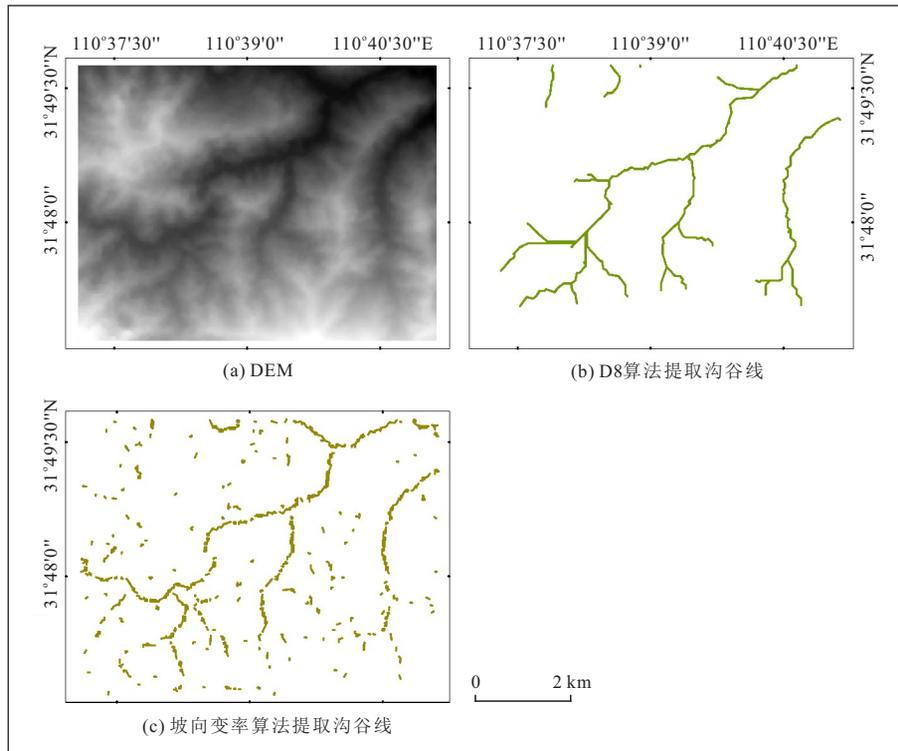


图 3 基于 DEM 提取沟谷线

Fig.3 Extracting gully lines based on DEM

表 1 分类规则

Table 1 The rules of classification

目标特征	长/宽	主方向纹理特征	坡度	归一化植被指数	灰度共生矩阵
Forest			<30°	>0.2	124~129
Road	>2	70°~110°			114~123
Gully		80°~130°	>20°		122~128
Farm			<30°	0.21~0.30	90~110

采用基于距离制图的沟壑膨胀方法处理沟谷线的断裂. 沟谷线形态膨胀时的最大膨胀半径为 30 m, 与 DEM 空间分辨率一致. 膨胀结果如图 5 所示.

将利用距离制图法所得的沟壑膨胀结果与面向对象分类方法提取的沟壑结果进行重分类, 将沟壑像元灰度值赋为 1, 非沟壑像元灰度值赋为 0. 叠加重分类后的三幅栅格图像, 得到新的沟壑区域分布栅格图像, 图像中像元灰度值有 0、1、2、3 这 4 种值. 其中灰度值为 0 的像元表示该像元在 3 种传统的沟壑提取方法的提取结果中都被认为是非沟壑, 灰度值为 1 的像元表示该像元仅在某一种方法的提取结果中被认为是沟壑区域, 灰度值为 2 的像元表示该像元仅在某一种方法的提取结果中认为是非沟壑区域, 灰度值为 3 表示该像元在 3 种方法的

提取结果中都被认为是沟壑区域. 本文假定至少在两种沟壑提取结果中被认为是沟壑的像元才是真实的地表沟壑区域, 其余像元都是伪沟壑区域. 根据以上规则可知灰度值小于或等于 1 的像元被认为是伪沟壑区域, 灰度值大于 1 的像元被认为是真实沟壑区域. 提取灰度值大于 1 的像元即得到该区域的沟壑提取结果如图 6.

通过对神农架林区沟壑的提取实验, 实验结果表明: 本文提出的沟壑提取方法提高沟壑识别精度, 有效保证了沟壑的连通性, 使提取结果与真实的地形特征更加符合.

为了验证本文提出的沟壑提取方法对沟壑的识别精度, 按照 2.4 节定义的精度评价方法, 通过人工目视解译的方式在研究区域随机选取了 200 个验证点. 通过目视解译验证, 在 36 个沟壑验证点中, D8 算法、坡向变率算法、面向对象分类方法和融合提取方法正确识别的沟壑点分别为: 22 个、20 个、27 个和 30 个. 在 164 个非沟壑验证点中, 上述 4 种方法正确识别的非沟壑点分别为: 147、133、150、154 个. 从整体的提取精度来看, D8 算法的总精度为 84.5%, 坡向变率算法的总精度为 76.5%, 面向对象分类方法的总精度为 88.5%, 融合提取方法的总精



图 4 面向对象分类结果

Fig.4 The result of object-oriented classification

a.原始影像;b.面向对象分类结果

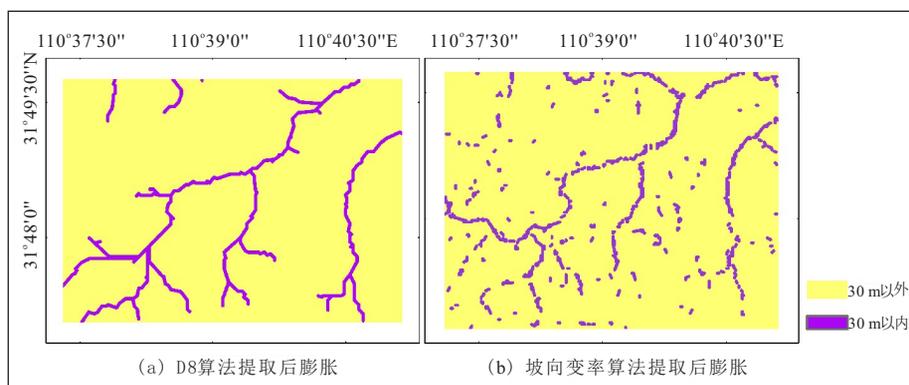


图 5 膨胀后的沟谷线

Fig.5 The expanded gully lines

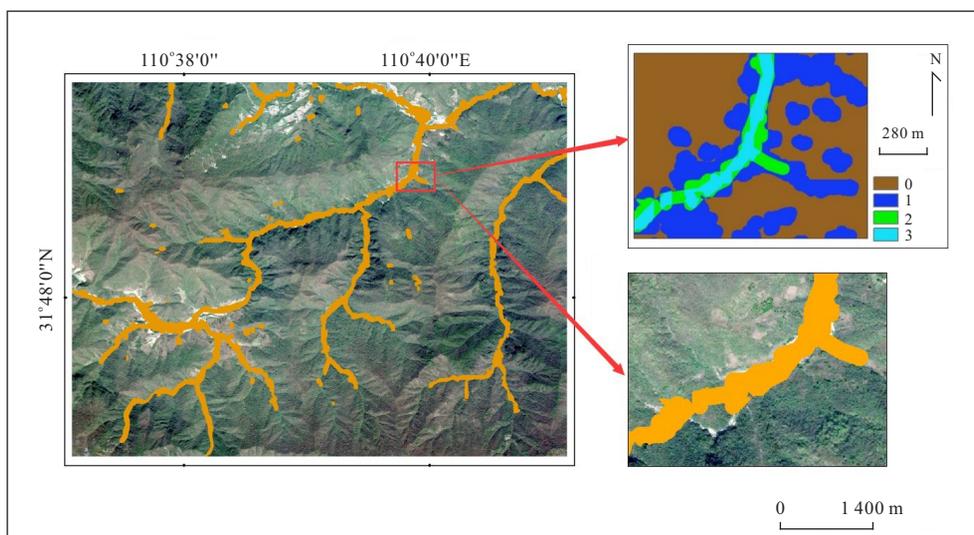


图 6 沟壑提取结果

Fig.6 The results of gully extraction

0~3表示灰度值

表 2 精度评价矩阵

Table 2 The accuracy evaluation matrix

指标	沟壑提取	非沟壑提取	总体精度
	精度	精度	
水文分析法	61.1%	89.6%	84.5%
坡向变率法	55.6%	81.1%	76.5%
面向对象的分类法	75%	91.5%	88.5%
融合提取方法	83.3%	93.9%	92%

度为 92%(表 2). 尤其是在对沟壑的提取精度上, 综合了原有的 3 种方法的优点, 有着很明显的提高.

3 结论和展望

本文针对基于 DEM 提取的沟壑无法详细地描述沟壑细节部分、连通性差; 基于高分辨率遥感影像提取沟壑时光谱特征弱等问题. 在基于距离制图法的沟壑膨胀和基于栅格叠加分析的沟壑融合的基础上, 实现了一种联合 DEM 和高分辨率遥感影像的地表沟壑提取方法. 该方法充分利用了沟壑在 DEM 上的地形表面特征及其在高分辨率遥感影像上的纹理特征, 融合了 3 种传统的沟壑提取结果, 实现了沟壑的精细化定位与提取, 使得沟壑细节部分特征的描述更为准确. 实验结果表明, 该方法能够较精确地识别出地表沟壑, 可以为遥感找矿、城市规划、水土保持等领域提供必要的技术支撑和决策支持. 通过对神农架林区的沟壑提取实验, 研究得出以下结论.

(1) 3 种沟壑提取方法都能够识别定位沟壑区域, 但是在识别精度等方面都存在一定的缺陷. D8 算法提取的沟谷线由于其数据形式的特殊性, 无法描述沟壑的细节部分. 坡向变率算法提取的沟谷线存在较多断裂区域. 面向对象分类方法提取的沟壑区域虽然能很好地表达沟壑的细节部分, 但是也存在较多的断裂区域, 不具有连通性.

(2) 面向对象分类方法相较于其他两种方法在表达沟壑的细节部分方面更加突出. 本文通过分析比较研究区域内不同地物类别的光谱特征和纹理特征, 确立了分割效果较好的分割参数, 建立了一套从长宽比、主方向、坡度、归一化植被指数、全方向的灰度共生矩阵 5 个参数角度来判别沟壑区域的分类规则. 利用该分类规则能够获得细节部分较为丰富的沟壑提取结果.

(3) 本文提出的基于 DEM 和高分辨率遥感影像的“膨胀—融合”式地表沟壑提取方法能够综合

多种传统沟壑提取方法的优点. 在确保提取沟壑的连通性的前提下能够很好地描述沟壑的细节部分, 使提取的结果相比较于其他 3 种传统方法更符合真实的地表特征.

在膨胀沟谷线的过程中, 由于采用了统一的沟壑膨胀系数, 部分细节处仍然存在不连续的沟壑. 后续可考虑对膨胀系数进行自适应调整, 以期实现区域沟壑的全连通性. 同时, 本实验采用的遥感影像分辨率有限, 制约了面向对象分类方法沟壑提取的精度. 后续研究中计划尝试更高分辨率的遥感影像数据, 以期获得更加精确的沟壑提取结果.

References

- Band, L. E., 1986. Topographic Partition of Watershed with Digital Elevation Models. *Water Resources Research*, 22(1):15–24.
- Cao, B., Qin, Q. M., Ma, H. J., et al., 2006. Application of Object-Oriented Approach to SPOT5 Image Classification: A Case Study in Haidian District, Beijing City. *Geography and Geo-Information Science*, 22(2): 46–49(in Chinese with English abstract).
- Chen, T., Zhou, R. L., Zhu, D. Y., et al., 2011. Comparative Study on Two Line Algorithm Methods of Terrain Feature Extraction Based on DEM. *Forest Inventory and Planning*, 36(6):1–4(in Chinese with English abstract).
- Hou, Q. Q., Wang, F., Yan, L., 2013. Extraction of Color Image Texture Feature Based on Gray-Level Co-Occurrence Matrix. *Remote Sensing for Land & Resources*, 25(4):26–32(in Chinese with English abstract).
- Huang, X. J., Wu, Z. H., Huang, X. L., et al., 2018. Tectonic Geomorphology Constrains on Quaternary Activity and Segmentation along Chenghai-Binchuan Fault Zone in Northwest Yunnan, China. *Earth Science*, 43(12):4651–4670 (in Chinese with English abstract).
- Jin, F., 2013. Research on Residents Extraction of RS Images Based on Texture Features (Dissertation). PLA Information Engineering University, Zhengzhou(in Chinese with English abstract).
- Li, B. B., Huang, L., 2013. Study on Recognition of the Gully in Loess Hilly-Gully Region Based on Object-Oriented Technology. *Research of Soil and Water Conservation*, 20(3):115–119(in Chinese with English abstract).
- Liu, X., Lü, X. B., Wu, C. M., et al., 2020. Topographic Correction Method for High Spatial Resolution Remote Sensing Data in Mountainous Area. *Earth Science*, 45(2):645–662 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. J., Wang, Y. J., Ren, Z., et al., 2008. Algorithm for Ex-

- tracting Drainage Network Based on Triangulated Irregular Network. *Journal of Hydraulic Engineering*, 39(1): 27-34(in Chinese with English abstract).
- Knight, J., Spencer, J., Brooks, A., et al., 2007. Large-Area, High-Resolution Remote Sensing Based Mapping of Alluvial Gully Erosion in Australia's Tropical Rivers. Proceedings of the 5th Australia Stream Management Conference. Charles Sturt University, 199-204.
- Martz, W., de Jong, E., 1988. Catch: A Fortran Program for Measuring Catchment Area from Digital Elevation Model. *Computers & Geosciences*, 14(5):627-640. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(88\)90018-0](https://doi.org/10.1016/0098-3004(88)90018-0)
- O' Callaghan, J. F., Mark, D. M., 1984. The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28(3): 323-344.
- Prosser, I.P., Slade, C.J., 1994. Gully Formation and the Role of Valley-Floor Vegetation, Southeastern Australia. *Geology*, 22(12):1127.
- Rajesh, B. V. S., Norman, K., Victor, J., 2011. Object-Based Gully Feature Extraction Using High Spatial Resolution Imagery. *Geomorphology*, 134(3-4): 260-268. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.07.003>
- Tang, G.A., Li, F.Y., Liu, X.J., 2010. Digital Elevation Model Tutorial. Science Press, Beijing, 145-149, 157-158 (in Chinese).
- Wang, W.C., Zou, W.B., 2013. Methods of Extraction in High Resolution Remote Sensing Image Information. *Beijing Surveying and Mapping*, (4): 1-5(in Chinese with English abstract).
- Wood, J.D., 1996. The Geomorphological Characterization of Digital Elevation Model (Dissertation). University of Leicester, UK.
- Wu, L. C., 2005. A Research on Gully Characteristics and Their Spatial Variance Based on DEM in the Loess Plateau (Dissertation). Northwest University, Xi'an(in Chinese with English abstract).
- Xie, Y. Q., Tang, G. A., Jiang, L., 2013. Characteristics and Correcting Methods of Errors in Extraction of SOA Based on DEMs. *Geography and Geo-Information Science*, 29(2):49-53(in Chinese with English abstract).
- Zhang, W., Wu, X., Lu, C. J., et al., 2016. Determination of Flow Accumulation Threshold Based on Multiple Regression Model in Raster River Networks Extraction. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 47(10): 131-138 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, C.M., Luo, J.C., Shen, Z.F., et al., 2013. River Liner Water Adaptive Auto-Extraction on Remote Sensing Image Aided by DEM. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 42(2):277-283(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹宝, 秦其明, 马海建, 等, 2006. 面向对象方法在 SPOT5 遥感图像分类中的应用: 以北京市海淀区为例. *地理与地理信息科学*, 22(2):46-49.
- 陈婷, 周汝良, 朱大运, 等, 2011. 基于 DEM 的 2 种提取地形特征线算法对比研究. *林业调查规划*, 36(6):1-4.
- 侯群群, 王飞, 严丽, 2013. 基于灰度共生矩阵的彩色遥感图像纹理特征提取. *国土资源遥感*, 25(4):26-32.
- 黄小巾, 吴中海, 黄小龙, 等, 2018. 滇西北程海-宾川断裂带第四纪分段活动性的构造地貌表现与限定. *地球科学*, 43(12):4651-4670.
- 金飞, 2013. 基于纹理特征的遥感影像居民地提取技术研究(博士学位论文). 郑州:解放军信息工程大学.
- 李斌兵, 黄磊, 2013. 基于面向对象技术的黄土丘陵沟壑区切沟遥感提取方法研究. *水土保持研究*, 20(3):115-119.
- 柳潇, 吕新彪, 吴春明, 等, 2020. 面向高空间分辨率遥感影像的山区地形校正方法. *地球科学*, 45(2):645-662.
- 刘学军, 王永君, 任政, 等, 2008. 基于不规则三角网的河网提取算法. *水利学报*, 39(1):27-34.
- 汤国安, 李发源, 刘学军, 2010. 数字高程模型教程. 北京:科学出版社, 145-149, 157-158.
- 王伟超, 邹维宝, 2013. 高分辨率遥感影像信息提取方法综述. *北京测绘*, (4):1-5.
- 吴良超, 2005. 基于 DEM 的黄土高原沟壑特征及其空间分异规律研究(硕士学位论文). 西安:西北大学.
- 谢轶群, 汤国安, 江岭, 2013. DEM 提取坡向变率中的误差特征与消除方法. *地理与地理信息科学*, 29(2):49-53.
- 张唯, 伍霞, 卢灿灿, 等, 2016. 基于多元回归的栅格水系阈值计算模型. *农业机械学报*, 47(10):131-138.
- 朱长明, 骆剑承, 沈占锋, 等, 2013. DEM 辅助下的河道细小线性水体自适应迭代提取. *测绘学报*, 42(2):277-283.