

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.031

基于优化地貌特征和纹理信息的黄土高原沟缘线提取方法

罗志东^{1,2} 刘二佳³ 齐实^{1,4} 姚占军¹

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 水利部水土保持监测中心, 北京 100053;
3. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 4. 水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083)

摘要: 沟缘线是黄土高原地区的典型特征线,其提取结果是构建地表空间分布式水土流失过程模型的基础。本文提出了基于优化地貌特征和纹理信息的面向对象沟缘线自动提取方法,即通过构建适宜的地形因子和纹理信息,利用地物的几何结构、地形纹理和相邻像元差异性的关系,采用面向对象多尺度分割技术,基于决策树分类的方法提取沟缘线。选取沟缘线发育典型的黄土高原地区,以1:10 000的DEM为数据源,确定了最优的分割参数和分类特征。相对于人工识别的沟缘线,该方法提取的结果在4个像元缓冲范围内为90%,绝对误差均值为2~3个像元,最大误差为4~6个像元。通过与基于坡面形态特征及汇水过程特点的提取算法进行对比,可知该方法克服了传统从形态特征出发的自动提取结果出现大量噪声的缺陷,提高了沟缘线提取精度,位置准确性增强,为黄土高原大范围宏观地貌分异研究提供了有效的方法和途径。

关键词: 黄土高原沟壑区; 沟缘线; 数字等高模型; 面向对象; 灰度共生矩阵

中图分类号: P283 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)01-0285-07

Method of Gully Extraction Based on Optimized Geomorphological Features and Texture Information in Loess Plateau

LUO Zhidong^{1,2} LIU Erjia³ QI Shi^{1,4} YAO Zhanjun¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China
2. Water and Soil Conservation Monitoring Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China
3. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China
4. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and State Forestry Administration, Beijing 100083, China)

Abstract: The extraction of shoulder lines of valleys on the Loess Plateau is the basis of constructing the surficial spatial distribution of soil and water loss. A shoulder-line extraction method was proposed by using optimized topographical texture information. Based on the 1:10 000 DEM data and GF-1 remote sensing images, areas with obvious shoulder lines of valleys on the Loess Plateau were taken as the research object. Considering texture features of the gray level co-occurrence matrix of the terrain, along with geometrical structures of ground objects, terrain texture and differences of adjacent pixels, the gully edge of the typical watershed was extracted by using the object-oriented method. The extraction results were further validated by comparing with the morphological characteristics of the slope and the draining characteristics of the catchment. The results showed that elevation, illumination simulation, surface depth of cut, slope and other related weakness, as well as the topography texture features such as homogeneity, variance, contrast, correlation, etc., were employed in the ridge-line extraction. Compared with empirical interpretation based on experts' knowledge, offsets within four pixel for over 90% of the grid, with the average of absolute errors within 2~3 pixel and the maximum error was 4~6 pixel. The method fully exploited the features of strong correlation and heterogeneity between pixels in the upstream and downstream of the ditch margin, which had strong anti-noise ability and effectively weakened the mixing of positive and negative topography units. It also reduced the data redundancy of post-processing, and realized the balance of classification accuracy, efficiency and operability, which provided an effective method and approach for the macroscopic landform differentiation on the Loess Plateau.

Key words: gully area of Loess Plateau; shoulder line of valleys; DEM; object-oriented; gray level co-occurrence matrix

收稿日期: 2018-05-21 修回日期: 2018-10-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0503705)和高分水利遥感应用示范系统(一期)项目(08-Y30B07-9001-13/15)

作者简介: 罗志东(1980—),男,博士生,水利部水土保持监测中心高级工程师,主要从事土壤侵蚀监测研究,E-mail: luozhidong@mwr.gov.cn

通信作者: 齐实(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事水土保持与流域治理研究,E-mail: 443298302@qq.com

0 引言

黄土高原在长期流水侵蚀下,形成支离破碎、沟壑纵横的黄土地貌景观。沟缘线作为沟间地(正地形)和沟谷地(负地形)的分界线^[1],是切沟、冲沟最为发育的部位,影响物质与能量传输过程,造成正负地貌单元在土壤类型、地表组成、地貌特征、侵蚀营力等方面产生巨大差异^[2-3]。研究其空间分布及变化特征有助于全面分析黄土高原地貌演变情况和衡量地表侵蚀状况^[4-5],为制定区域水土保持规划、水土保持措施布局及土地覆被调查奠定数据基础。

国内沟缘线传统提取方法主要是利用地形图或遥感影像为底图,采取人工目视勾绘方式进行,该方式受人为因素影响多、工作量大。随着地理信息技术的发展,基于栅格 DEM 数据自动提取沟缘线技术成为主要研究热点。目前,基于栅格 DEM 数据自动提取地貌技术的思路,主要是从水文学和地貌形态学角度出发的,基于地貌形态学基本特征单元提出了沟缘线提取方法,利用数字高程模型单元衍生的坡度、坡向、剖面曲率,汇流路径、汇水区域和沟壑分布等地貌特征信息,建立地貌实体形态组合,判断其阈值提取规则,实现沟缘线空间分布的识别^[3,6-10]。从目前已有的研究结果来看,该类型方法过于依赖区域特点,参数本身的有效性和适用性以及窗口的大小均会对提取结果产生重要影响,且容易出现连续性差的问题,增大后处理工作量,因此基于此基础的沟缘线自动提取技术还需进一步改进。另外,王轲等^[11]采用地形开度和差值图像阈值分割原理相结合的方法提取沟缘线,该方法在寻找最佳分割阈值、增强最佳分割阈值,针对不同地域沟缘线形态的适用性上还存在很大的局限性。晏实江等^[12]采用边缘检测方法,将数字高程模型单元看作灰度图像,通过梯度算子检测其突变点,实现沟缘线的提取,该方法对灰度变化敏感但是未考虑沟缘线的地理学意义,产生大量随机噪声,部分边缘线条断裂,且耗时长。面向对象提取不仅能充分获取光谱特征,还可以利用几何和空间信息,该方法已经在典型地形地貌类型的提取上得以应用。齐威^[13]利用面向对象的方法,基于亮度均值标准差法和最大面积法确定最优分割尺度因子,实现黄土陷穴的自动提取,提取精度达到 92.3%,该方法为黄土高原地区的陷穴提取以及其他典型微地貌的提取提供了技术参考。田丹等^[14]以中国 1:1 000 000 DEM 为数据源,利用相关分析和熵值法筛选确定地貌分类的地形因子组合,基于随机森林分类树评价各地形因子的重要性,获取面向对象各图层的阈值,通过灰度共生矩阵纹

理信息构成分类样本知识库进行全国地貌分类,分类结果与实际地貌分异基本吻合。SHRUTHI 等^[15]基于面向对象的方法提取沟壑的大小、形状和发生过程,分析沟壑的变迁,认为面向对象分析法比传统的像素方法对地表的反映更客观。

综合前人研究方法中存在的问题,本文针对黄土高原沟壑区,以地表形态空间分异自然规律为有效切入点,基于地形空间形态特征分析思想,兼顾不同尺度的地貌特征,提出一种基于优化地貌特征和深度纹理信息的面向对象多尺度分割和决策树分类的沟缘线自动提取方法,以期进一步改善栅格技术方法的适用性与识别精度,避免地貌像元的信息孤岛,优化提取结果与效率,为推广至大范围宏观地貌空间分异研究奠定基础。

1 研究区及数据概况

1.1 研究区概况

以甘肃省庆阳市西峰区的砚瓦川典型区域为研究对象。该区域属于泾河二级支流,是陇东黄土高原董志塬腹地。研究区面积为 24.6 km²,地理位置 107°41'15"~107°45'00"E,35°40'00"~35°42'30"N,海拔 1 090~1 365 m,地形南北呈扇形,塬面完整,属温带大陆性半干旱气候,年降水量 400~600 mm,且年内分配不均,7—9 月降水量约占年降水总量的 60%,年平均气温 10℃,年无霜期 160~180 d,光照充足,四季分明。主要土壤类型有黑垆土、黄绵土和新积土等。植被属暖温性森林草原带型,基本上无天然森林植被,阴坡生长的优势种有大针茅、铁杆蒿、茵陈蒿、沙草等,覆盖度 60%~100%,阳坡生长的优势种有白羊草、本氏针茅、麻蒿、茵陈蒿、短花针茅、隐子草等,覆盖度 30%~90%^[16]。

1.2 数据概况

采用 2005 年国家测绘局生产的 1:10 000 比例尺 5 m 分辨率的 DEM 数据,数据精度满足国家测绘行业标准(CH/T 1008—2001)。图幅号分别为 I48G008092 和 J49G010081,面积为 26.02 km² 和 27.28 km²,其中 I48G008092 用于探究沟缘线提取方法,J49G010081 用于验证提取方法的适用性。遥感数据采用 GF-1 影像,影像获取时间为 2014 年 7 月 11 日,数据质量较好,无条带和偏色。为了消除影像传感器和大气对地物光谱值的影响,首先利用 FLAASH 模型对多光谱影像进行大气校正。然后,采用有理函数模型进行正射校正,并利用最邻近法进行采样。最后,采用 Pansharpen 算法将 8 m 的多光谱数据和 2 m 的全色波段数据融合,生成分辨率为 2 m 的多波段图像。结合遥感影像和 DEM 网格数

据人工目视识别沟缘线,用于与自动提取结果进行对比。

2 研究方法

通过全面分析地形特征因子和纹理因子,构建充分反映沟缘线特征的最优因子,并形成“多波段影像”,采用面向对象多尺度分割方法,充分利用深度纹理信息,通过 Jeffries - Matusita 距离(J - M 距离)法筛选适用于本研究提取目标的多特征指数,利用决策树分类方式,生成树型结构的判别函数,结合专家知识,确定各特征规则的参数,建立下层节点和分支,实现正负地貌单元的划分,进而提取沟缘线。

2.1 最优地形因子构建

地形因子是地形信息的载体和重要表现形式之一,DEM 及其衍生数据所构建的数字矩阵的结合能够完整地反映地形在某个侧面实体的形态特征,为地形特征的分析提供了更多的数据源。选取数字地形分析中常用的地形因子:高程、高程变异系数、地表切割深度、坡度、坡度变率、光照模拟值(图1),通过标准差和相关性对适用于地形因子提取的指标进

行筛选。其中,标准差反映图像相对于均值的离散程度,标准差越大则灰度级分布越分散,包含的信息量越趋于最大。由于不同地形因子表达的信息往往存在相关性,物理意义相似,信息具有较大的重叠,因此在沟缘线提取的过程中势必会造成信息的冗余,需要对相关性弱的地形因子进行筛选。采用信息熵对相关度高的指标进行筛选,该值越大,携带的信息量越多,越有利于沟缘线的提取。DEM 数据纹理特征是反映图像表面同质现象的重要信息,是不同物体差异的重要依据。研究表明,统计型纹理分析方法更适用于自然纹理的提取^[17-18]。本文选择统计型纹理中的灰度共生矩阵模型,对图像的纹理特征进行表达。它是通过将高程数据和衍生因子进行相应的灰度域映射,统计栅格 i 和 j 的图像灰度,在点对距离为 d , 栅格点对方向角为 θ 的情况下同时出现的频度 $p(i, j, d, \theta)$, 生成灰度共生矩阵 $C(d, \theta)$ 。从特征值稳定性的角度分析,选择 $d = 3$ 为共生矩阵点对距离参数,不考虑点对方向改变的影响,将 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 共 4 个方向分别计算的特征参数取均值。借鉴文献[18]的研究成果,选取 8 个纹理特征。

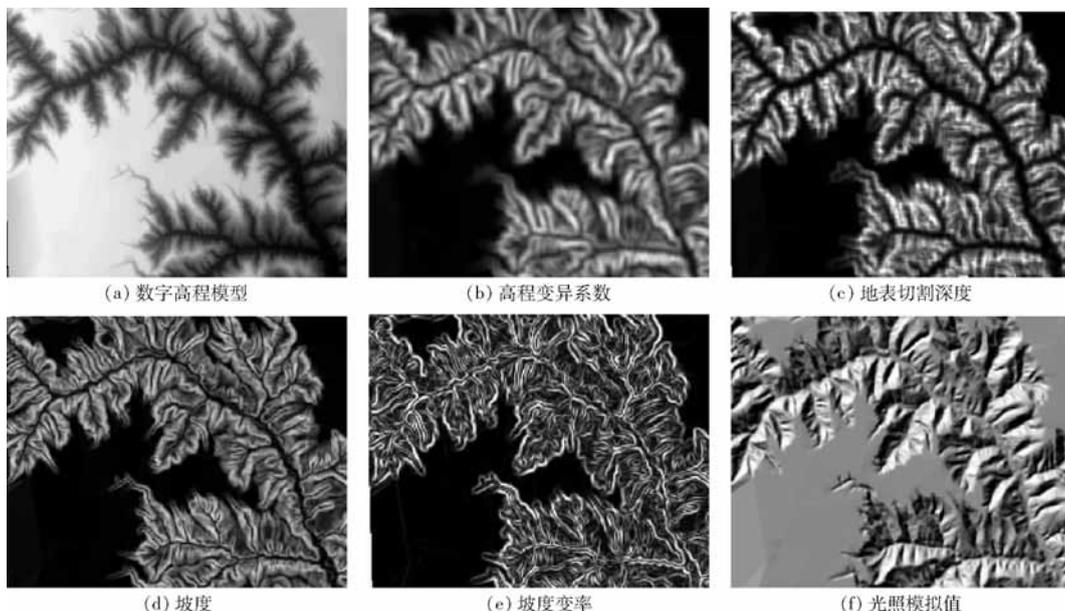


图1 DEM 及其衍生因子

Fig. 1 DEM and its derivatives diagrams

2.2 地形分割

面向对象思想的遥感分类方法的核心技术是影像分割和特征分类算法^[19-20]。本文利用分形网络进化分割算法(Fractal net evolution algorithm, FNEA),结合沟缘线的分布特征,基于“影像”不同的尺度、不同“波段”组合、同质性因子,根据各地形及其衍生因子的特征产生最初的分割对象,构建在影像上识别和划分的区域,选用信息熵作为内部同

质性评价指标,分割强度作为邻域异质性评价指标,通过逐次调整分割尺度,实现整个区域的最优自动分割^[21-23]。

2.3 J - M 距离可分离性特征分析

结合正负地貌的地表特征,通过 J - M 距离变量,获取正负地貌单元在各特征上的 J - M 距离可分离性矩阵,选择区分性最强的特征进行组合,构建描述某类地物的最优特征空间。J - M 距离法的取

值范围为 $[0, 2]$, $J-M$ 距离越大, 说明两类在 f 特征的可分性越强。其中, 0 表示两种类别在某个特征上完全混淆, 2 表示两种类别在某个特征上能够完全分开, 通常认为, $J-M$ 距离大于 1.8 的类别分离性较强, 而小于 1 的类别可分性较差, 可进行合并处理。计算公式为

$$J = 2(1 - e^{-B}) \quad (1)$$

$$\text{其中 } B = \frac{1}{4} \frac{(m_1 - m_2)^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} + \frac{1}{2} \ln \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{2\sigma_1\sigma_2} \quad (2)$$

式中 J ——距离

B —— c_1, c_2 两种类别基于 f 特征的巴氏距离

m_1, m_2 —— c_1, c_2 两种类别基于 f 特征的均值

σ_1, σ_2 —— c_1, c_2 两种类别基于 f 特征的标准差

2.4 决策树构建和沟缘线信息提取

由于正负地貌单元的某些特征值仍存在交叉的情况, 使用单一阈值建立特征规则会产生混淆或遗漏提取的现象。因此, 基于选择的对象特征的组合, 利用深度纹理信息, 按照决策树 CART4.5 分类的方式, 逐层确定各特征的函数和参数, 形成正负地貌提取的规则集, 识别沟缘线。决策树信息增益指数的计算公式为

$$Gini_{split}(T) = \sum_{j=1}^n \frac{N_j}{N} Gini(T) \quad (3)$$

$$\text{其中 } Gini(T) = 1 - \sum_{j=1}^n p_j^2 \quad (4)$$

式中 N ——样本的集合

N_i ——根据某特征分成的子集

T ——结点

p_j —— j 类在 T 结点中的相对频率

2.5 精度评价

依据实践经验和专业知识, 以 2 m 分辨率的遥感影像为数据源, 通过人工识别的方法提取沟缘线, 并作为精度评价的基准, 评价的指标为提取的沟缘线与人工提取沟缘线的偏移距离, 即偏差, 计算公式为

$$D_{mean} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (5)$$

$$D_{max} = \max(|x_i - y_i|) \quad (6)$$

式中 i ——沟缘线栅格编号

x_i ——编号为 i 样本的提取结果

y_i ——编号为 i 样本的目视解译结果

n ——沟缘线栅格点总数

D_{mean}, D_{max} ——绝对误差均值和最大值

3 结果与分析

3.1 地形因子数据集构建

由表 1 可知, 高程和光照模拟值的标准差较大,

因此二者可作为后期沟缘线信息提取的主要因子。通过分析表 2 可知, 坡度变率与坡度、坡度变率与地表切割深度之间均存在高度的相关性, 因此选择其中一种因子与其他因子组合以进行正负地貌单元的划分。坡度、坡度变率、地表切割深度的信息熵分别为 0.18、0.22、0.15。结合前人关于地貌特征提取的研究成果^[3, 6-10, 13-14]和本研究的分析, 确定了参与目标提取的地形因子为高程、光照模拟值、坡度、坡度变率。为了进一步分析空间特征的合理性, 从沟缘线的上下游各选取 20 个样点, 统计筛选出各个指标值(图 2)。数据集曲线表明上述特征因子在沟缘线上下游的正负地貌单元上差异大, 利用该数据集可作为沟缘线提取的有效分类特征。

表 1 各因子统计结果

Tab. 1 Statistics results of each factor

指标	最小值	最大值	均值	标准差
高程/m	1 090.00	1 365.00	1 271.33	70.02
高程变异系数	0	0.03	0.01	0.01
地表切割深度/m	0	136.61	30.68	24.21
坡度/(°)	0	72.08	19.08	15.34
坡度变率/%	0	51.33	11.05	9.89
光照模拟值	0	254.00	161.65	51.87

表 2 相关系数

Tab. 2 Correlation coefficient

指标	高程	高程变 异系数	地表切 割深度	坡度	坡度 变率	光照模 拟值
高程	1					
高程变异系数	-0.82	1				
地表切割深度	-0.18	0.77	1			
坡度	-0.52	0.70	0.68	1		
坡度变率	-0.57	0.77	0.81	0.86	1	
光照模拟值	0.15	-0.26	-0.23	-0.31	-0.25	1

3.2 地形纹理数据集构建

鉴于各纹理指标的信息具有一定的冗余程度, 为避免相似物理含义和相关性强的纹理参数参与后期提取而影响提取结果, 采用 DEM 及光照模拟数据, 通过对各特征指标的分类和筛选以及相关性的分析, 获取地形的纹理特征。如表 3 所示, 对比性与均值、熵与二阶矩、相异性与相关性的相关系数均大于 0.80。表 4 表明熵与二阶矩的相关系数也大于 0.80。地形纹理的周期性是描述纹理基本属性之一, 地形形态具有一定的自相似性, 在一定的尺度范围内, 地形的特征或结构要素会以一定的规律和周期频率重复, 其中, 熵和二阶矩主要是对纹理的周期性进行分析的指标, 从图像上分析, 对于提取沟缘线意义不大, 应将这两个因子删除。黄土高原地区在一定的尺度上具有空间分异规律, 沟缘线的提取势必需借助于其上下游或者邻域的空间差异性。地

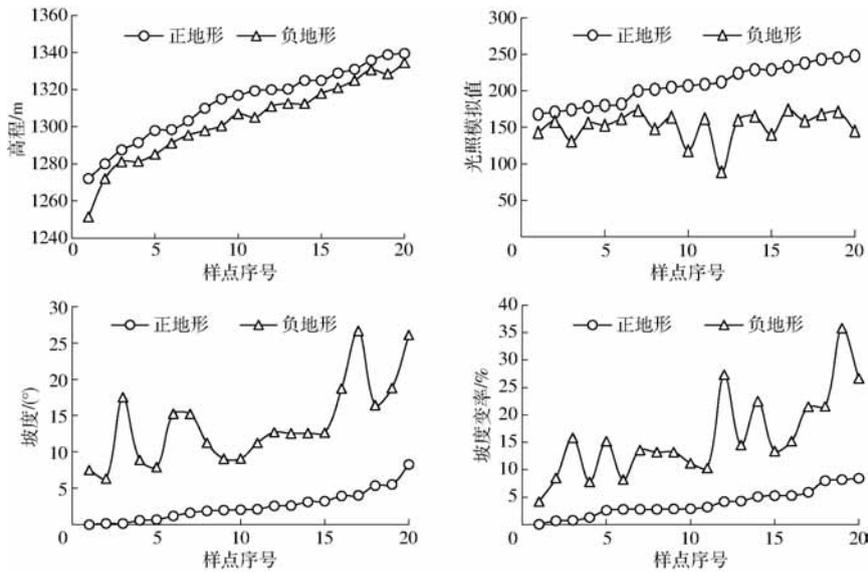


图 2 正负地貌 DEM 及其衍生因子分布图

Fig. 2 Positive and negative topography DEM and its derived factor distribution

形特征值对比度和相异性反映邻近栅格的差异程度,当邻近栅格的差异度越大,越有可能区分不同的地形形态。均值和表示灰度的变化情况,与 DEM 信

息重复,在提取过程中应该删除。综上所述,均质性、方差、对比性、相关性可用于区别不同地形特征的差异性,实现目标地物沟缘线的提取。

表 3 DEM 各地形纹理相关系数

Tab. 3 DEM topography texture correlation coefficient

	均质性	均值和	二阶矩	方差	对比性	相关性	相异性	熵
均质性	1							
均值和	0.07	1						
二阶矩	0.62	-0.10	1					
方差	-0.57	0.13	-0.30	1				
对比性	0.07	1.00	-0.10	0.13	1			
相关性	-0.54	0.10	-0.26	0.68	0.10	1		
相异性	-0.71	0.16	-0.37	0.72	0.16	0.94	1	
熵	-0.50	0.45	-0.83	0.37	0.45	0.32	0.45	1

表 4 光照模拟值相关系数

Tab. 4 Light simulation diagram correlation coefficient

	均质性	均值和	二阶矩	方差	对比性	相关性	相异性	熵
均质性	1							
均值和	0.38	1						
二阶矩	0.92	0.33	1					
方差	-0.32	-0.17	-0.26	1				
对比性	-0.35	-0.21	-0.27	0.82	1			
相关性	0.42	0.23	0.46	-0.13	-0.23	1		
相异性	-0.58	-0.26	-0.46	0.77	0.92	-0.29	1	
熵	-0.86	-0.10	-0.87	0.31	0.32	-0.35	0.55	1

3.3 沟缘线提取模型构建

利用高程、光照模拟值、坡度和坡度变率形成的最优“多波段影像”,采用决策树规则的面向对象的方法,构建 3 层结构的面向对象决策树模型,实现沟缘线信息提取(图 3)。通过多次试验,最终确定的参数为分割尺度(20)、形状(0.8)和紧致度(0.5)。节点层 0 为总节点;节点层 1,通过高程框定正地貌

和负地貌的范围;节点层 2,利用光照晕渲图、坡度和地表切割深度排除负地貌部分的误分;节点层 3,利用均质性、方差、对比性、相关性等纹理特征进一步排除负地貌部分的误分。

3.4 精度与对比分析

为进一步探索该方法在区域上的有效性和适用性,将本算法提取的结果应用于黄土丘陵沟壑区,结

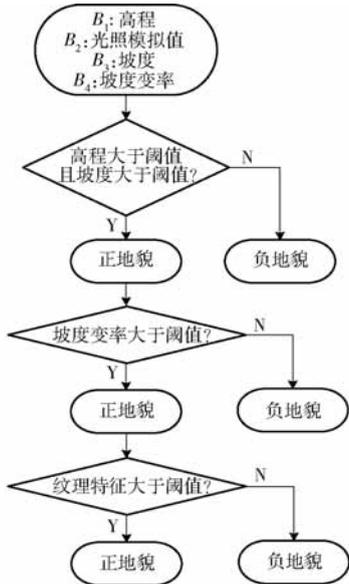
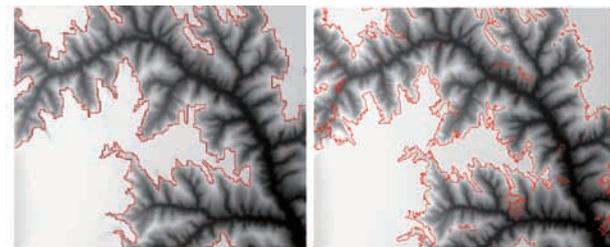


图3 面向对象分类决策树

Fig. 3 Classification decision tree based on object-oriented method

果表明本文分类方法仍具有明显优势。与人工解译的沟缘线趋势基本一致,正负地貌突变明显的区域,二者重合度较高。在正负地貌分类图上随机抽取均匀分布的20个样点,以人工目视解译结果为参照,对分类结果与真实地表的信息,对沟缘线提取结果进行精度评价,偏移结果在4个像元缓冲范围内为90%,绝对误差均值为2~3个像元,最大误差为4~6个像元(图4a)。误差大的主要原因有两个:



(a) 本文方法 (b) 基于坡面的形态特征及汇水过程特点算法

图4 提取结果对比

Fig. 4 Comparison of extraction results

②在沟缘线处坡度转折大,坡度小的区域坡度转折小,坡度大的区域提取效果有一定误差。

为比较并验证本文方法提取结果的准确度,采用一种典型的基于水文学和地貌形态学的研究方法——基于坡面的形态特征及汇水过程特点提取算法^[9]进行对比试验分析,综合评判两种方法提取结果的准确度及相互关系,结果如图4b所示。从对比结果可以看出,两种方法提取的沟缘线在空间分布以及形态特征等方面基本保持一致,宏观表现上具有很高的吻合程度,均可用于研究区的沟缘线提取。采用与本文前述相同的精度分析方法进行精度评价,结果表明,偏移结果在4个像元缓冲范围内为70%,绝对误差均值为4个像元,最大误差为8个像元,相对本文方法绝对误差均值低1~2个像元,最大误差低2~4个像元,总体精度偏低。同时提取的沟缘线出现不少噪声,椒盐现象明显,线段连续效果差,并且由于黄土地貌的复杂性,在沟道的内部具有少数散布的伪沟缘线点,后期处理工作量大。通过两种方法提取结果来看,本文方法较基于坡面的形态特征及汇水过程特点提取算法具有很好的总体综合效益。

4 结论

(1)提出了一种基于优化地貌特征和深度纹理信息的面向对象多尺度分割和决策树分类的沟缘线自动提取方法,逐层分类提取沟缘线。

(2)提取结果相对于人工识别的沟缘线,在4个像元缓冲范围内为90%,绝对误差均值为2~3个像元,最大误差为4~6个像元,与基于坡面的形态特征及汇水过程特点的提取算法相比,绝对误差均值降低了1~2个像元,最大误差降低了2~4个像元。

(3)本提取方法兼顾不同地貌对象的纹理等特征信息,充分挖掘沟缘线上下游领域像元间的相关性和异质性强特点,有较强的抗噪能力,有效地减弱正负地貌单元混分的现象,解决了连续性差、噪声多、耗时长的问题,减少了后处理的数据冗余性,实现了分类精度、效率和可操作性的平衡,为推广至大范围空间分异研究奠定了基础。

参 考 文 献

[1] 景可. 黄土高原沟谷侵蚀研究[J]. 地理科学, 1986, 6(4): 340-347.
JING Ke. A study on gully erosion on the Loess Plateau[J]. Scientia Geographica Sinica, 1986, 6(4): 340-347. (in Chinese)

[2] 闰国年, 钱亚东, 陈钟明. 基于栅格数字高程模型提取特征地貌技术研究[J]. 地理学报, 1998, 53(6): 562-570.
LÜ Guonian, QIAN Yadong, CHEN Zhongming. Automated extraction of the characteristics of topography from grid digital elevation data[J]. Acta Geographica Sinica, 1998, 53(6): 562-570. (in Chinese)

[3] 闰国年, 钱亚东, 陈钟明. 基于栅格数字高程模型自动提取黄土地貌沟沿线技术研究[J]. 地理科学, 1998, 18(6): 567-573.
LÜ Guonian, QIAN Yadong, CHEN Zhongming. Study of automated extraction of shoulder line of valley from grid digital

- elevation data[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1998, 18(6):567–573. (in Chinese)
- [4] VOGT J V, COLOMBO R, BERTOLO F. Deriving drainage networks and catchment boundaries: a new methodology combining digital elevation data and environmental characteristics[J]. *Geomorphology*, 2003, 53(3):281–298.
- [5] CHONG L, YANG D W. Deriving drainage networks and catchment boundaries from grid digital elevation model[J]. *Journal of China Institute of Water*, 2004(3):50–56.
- [6] SHENG J, TANG G, KAI L. A new extraction method of loess shoulder-line based on marr-hildreth operator and terrain mask[J]. *Plos One*, 2014, 10(4):e0123804.
- [7] 刘鹏举, 朱清科, 吴东亮, 等. 基于栅格 DEM 与水流路径的黄土区沟缘线自动提取技术研究[J]. *北京林业大学学报*, 2006, 28(4):72–76.
- LIU Pengju, ZHU Qingke, WU Dongliang, et al. Automated extraction of shoulder line of valleys based on flow paths from grid digital elevation model (DEM) data[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(4):72–76. (in Chinese)
- [8] 朱红春, 汤国安, 张友顺, 等. 基于 DEM 提取黄土丘陵区沟沿线[J]. *水土保持通报*, 2003, 23(5):43–46.
- ZHU Hongchun, TANG Guoan, ZHANG Youshun, et al. Thalweg in loess hill area based on DEM[J]. *Bulletin of Soil & Water Conservation*, 2003, 23(5):43–46. (in Chinese)
- [9] 周毅, 汤国安, 王春, 等. 基于高分辨率 DEM 的黄土地貌正负地形自动分割技术研究[J]. *地理科学*, 2010, 30(2):261–266.
- ZHOU Yi, TANG Guoan, WANG Chun, et al. Automatic segmentation of loess positive and negative terrains based on high resolution grid DEMs[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(2):261–266. (in Chinese)
- [10] 李敏, 杨昕, 陈盼盼, 等. 面向点云数据的黄土丘陵沟壑区沟沿线自动提取方法[J]. *地球信息科学学报*, 2016, 18(7):869–877.
- LI Min, YANG Xin, CHEN Panpan, et al. Method of automatic shoulder line extraction in the loess hilly area based on point cloud data[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2016, 18(7):869–877. (in Chinese)
- [11] 王轲, 王琤, 张青峰, 等. 地形开度和差值图像阈值分割原理相结合的黄土高原沟沿线提取法[J]. *测绘学报*, 2015, 44(1):67–75.
- WANG Ke, WANG Zheng, ZHANG Qingfeng, et al. Loess shoulder line extraction based on openness and threshold segmentation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(1):67–75. (in Chinese)
- [12] 晏实江, 汤国安, 李发源, 等. 利用 DEM 边缘检测进行黄土地貌沟沿线自动提取[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2011, 36(3):363–367.
- YAN Shijiang, TANG Guoan, LI Fayuan, et al. An edge detection based method for extraction of loess shoulder-line from grid DEM[J]. *Geomatics & Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(3):363–367. (in Chinese)
- [13] 齐威. 黄土陷穴的自动提取与分析研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2017.
- QI Wei. Research on automatic extraction and analysis of loess sinking hole[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2017. (in Chinese)
- [14] 田丹, 刘爱利, 丁浒, 等. 地貌形态类型面向对象分类法的改进[J]. *地理与地理信息科学*, 2016, 32(2):46–52.
- TIAN Dan, LIU Aili, DING Hu, et al. Improvement of object-oriented classification method for landform types[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2016, 32(2):46–52. (in Chinese)
- [15] SHRUTHI R B V, KERLE N, JETTEN V, et al. Quantifying temporal changes in gully erosion areas with object oriented analysis[J]. *Catena*, 2015, 128:262–277.
- [16] 王芸, 刘文兆, 李怀有, 等. 黄土高塬沟壑区砚瓦川流域水沙关系及其对流域治理的响应[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(8):1403–1413.
- WANG Yun, LIU Wenzhao, LI Huaiyou, et al. The flow-sediment relationship and its response to watershed management in Yanwachuan Watershed, Loess Plateau Gully Region, China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8):1403–1413. (in Chinese)
- [17] ILEA D E, WHELAN P F. Image segmentation based on the integration of colour-texture descriptors—a review[J]. *Pattern Recognition*, 2011, 44(10):2479–2501.
- [18] DUTTA S, DATTA A, CHAKLADAR N D, et al. Detection of tool condition from the turned surface images using an accurate grey level co-occurrence technique[J]. *Precision Engineering*, 2012, 36(3):458–466.
- [19] BLASCHKE T. Object based image analysis for remote sensing[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010, 65(1):2–16.
- [20] LUCIAN D, CLEMENS E. Automated object-based classification of topography from SRTM data[J]. *Geomorphology*, 2012, 141–142(4):21–33.
- [21] YONG Liu. Discrepancy measures for selecting optimal combination of parameter values in object-based image analysis[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 68(1):144–156.
- [22] QI Y, HUANG F, QI X. Feature extraction and scale analysis based on Quickbird image using object-oriented approach[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2008, 7147:27–36.
- [23] VICTOR A A Q. Metaheuristics for supervised parameter tuning of multiresolution segmentation[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(9):1364–1368.