

基于汇流累积计算的沟壑密度分析方法

吴秉校, 侯雷, 宋敏敏, 吴发启

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 沟壑密度是评价地表侵蚀影响, 水土流失情况, 进行地貌类型分析等的重要指标。文章基于研究区填注后的DEM, 利用地表汇流累积分析原理和栅格重分类方法, 通过研究沟道覆盖区栅格数与汇流累积栅格二值化阈值间的关系, 选择合适的阈值用于提取地表沟道。然后结合自然地表高程, 分析合理的高程和相对高程栅格重分类阈值并进行高程栅格二值化, 将二值化结果作为乘积模板并配合栅格细化算法优化沟道提取结果。最终利用1 km²单位面积规则栅网对沟道提取结果进行目标栅格数统计计算, 得到地表沟壑密度值。结果显示, 该方法基于30 m分辨率DEM提取的西安市地表沟壑密度均值为1.29 km/km²。除雁塔区, 其余各行政区统计均值与前人研究结果基本吻合。试验结果证明, 基于本方法可以高效较精确地计算该市地表沟壑密度, 分析结果可以量化研究区沟壑密度特征值以及通过栅格像元灰度变化体现沟壑密度变化趋势。

关键词: 沟壑密度; 汇流累积量; 栅格重分类; 栅格细化

中图分类号: P931; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)03-0039-06

Gully Density Analysis Based on Flow Accumulation Method

WU Bingxiao, HOU Lei, Song Minmin, WU Faqi

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Gully density is an important indicator to assess the impact of surface erosion, soil erosion, land-form analysis etc. Based on DEM filling, using surface flow accumulation and raster reclassification analysis principles, we researched the relationship between the number of grids in the channel coverage area and the binarization threshold of the accumulation grids, and selected an appropriate threshold to extract the surface channel. According to the natural surface elevation, the reasonable thresholds were analyzed. Reclassifying the elevation and relative elevation rasters and thinning, we used the binarization results as the product template to optimize the channel extraction results. Finally, we calculated the number of target grids in each 1-km² unit area to qualify the grid raster density of research zone. The results showed that the mean value of surface gully density in Xi'an City is 1.29 km/km² based on DEM with 30 m resolution. In addition to the Yanta District, the results were consistent with previous studies in average gully density of the remaining administrative regions. It certificated that this analytical method can be used to calculate the density of the urban gully effectively and accurately. The results can be used to quantify the characteristic values of the gully density in the study area and reflect the variation trend of the gully density through the gray-scale variation of the grid pixels.

Keywords: gully density; flow accumulation; raster reclassified; grid refinement

沟壑密度(gully density)是地表每1 km²内侵蚀沟(或水文网)的总长度,是表征内外营力对地表侵蚀影响的重要指标,对研究区域水土流失状况和等级、土壤侵蚀状况、地貌演变与地质灾害分析、水土保持区划等具有重要意义。沟壑密度的大小与地表的切割破碎程度呈正相关关系,对于区域气候、土壤、地质条件、植被、生态适宜性研究亦有重要参考价值。作为一个重要的地貌特征表征指标,前人在进行相关研

究的过程中利用了多种手段和方法进行分析。在机助分析技术应用以前,传统的沟壑密度量测与计算主要基于外业调查和地形图。随着遥感影像和数字地形处理与分析技术的成熟和推广,凭借其快捷、高效、高精度、适用范围广的优势逐渐取代了传统的人为量测方法,成为沟壑密度分析的主要技术手段。

现在应用最广的沟壑密度分析方法主要基于数字等高线图和数字高程模型(Digital Elevation Model,

DEM)来进行。利用数字等高线图分析是基于矢量图形分析原理,依据地形特征,运用几何形态学理论,分析矢量线划的拓扑关系和几何特征,从而进行地表沟道提取,完成沟壑密度分析^[1-2]。该类方法能够自动化识别地形的特征点、线,提取结果连续性较好,适合于小范围高精度沟谷提取和密度计算,但完全依据几何理论分析,分析结果与实际地形特征有一定偏差。对于 DEM 分析提取的等高线,由于本身存在提取误差和锯齿状畸形,该方法适用性不佳。利用 DEM 分析沟壑密度,前人主要依据两种方法进行:基于水文分析中的汇流累积算法提取出地表径流路径作为沟谷线进行分析以及基于地表曲率的分析提取。基于地表曲率的方法是通过 DEM 进行地表曲率计算和求导,通过导数变化趋势,分析地形特征点、线,从而提取沟谷^[3]。该方法可以避免水文分析中由于汇流阈值给沟道提取结果带来的误差,但处理结果受 DEM 自身分辨率和误差影响较大,且需要人为剔除非沟谷线,沟谷提取结果连续性不佳,不利于地形破碎区的沟壑密度计算。基于汇流累积计算的方法是依据地表水文分析原理,通过一定的河网提取算法,利用 DEM 计算流向,汇流累积量并设置阈值提取地表径流路径,即区域水文网分布。该方法提取的沟谷特征线连续性较好,分析效率较高^[4-7]。但该类方法在河网提取过程中由于 DEM 自身误差和算法带来误差,造成了伪沟道和低洼平坦地区不合理平行水系的出现,在一定程度上影响了提取结果。单纯凭借汇流累积量提取沟道没有充分考虑到区域的自然地理背景,所以对于分析地形复杂区域沟壑密度存在缺陷。且传统的沟壑密度分析方法多考虑的是大范围内平均沟壑密度,对区域内部沟壑密度的变化状况不能实现统计单元尺度的较精确分析。本文利用 DEM,借助于水文分析算法,综合考虑地形低洼区域的剔除和自然地理条件因素,优化原有的沟壑密度分析算法,实现较大范围的地表沟壑密度基于统计单元尺度的快速较精确分析,并以西安市为研究区,对该市的 30 m 分辨率 DEM 进行分析计算,验证提取结果的合理性。

1 分析原理与方法

1.1 分析原理

(1) 沟壑密度计算。沟壑密度也称为沟谷密度,是评价单位面积内侵蚀沟(水文网)长度的定量指标,一般采用 km/km^2 为单位进行度量。自然地表形态分析中,沟壑可以视为地表径流路径。因此沟壑密度的分析可以借助于空间分析方法中的水文分析原理,提取出地表径流路径,计算径流路径长度,即可视为侵蚀沟长。

基于规则网格 DEM 的沟壑密度计算在提取沟壑长度时,结果为栅格数据格式,因此运用矢量线划度量必然存在矢栅转化误差,为了使计算效率提高,故可以对

这一指标做简单转化,以便于进行栅格数据分析。以面积为 1 km^2 的单元网格进行统计,可以较精确地表现一区域内沟壑密度的变化趋势,而不仅仅是区域的沟壑密度均值。如 DEM 有固定的空间分辨率(CS, Cellsize),单位为 m,以单元面积为 1 km^2 网格作为统计单元, N 为水文网覆盖区的目标栅格像元数,则每一统计单元的沟壑密度(GD)可以通过下式进行计算:

$$\text{GD} = \sqrt{\text{CS}^2 \cdot N / 1000000} \quad (1)$$

(2) 沟壑提取。基于水文分析方法的地表沟壑提取与地表径流路径提取类似,这里进行概述。原始 DEM 存在误差和不合理凹陷,自然水流在形成汇流路径过程中,会填充洼地,并选择洼地的最低出流点流出。因此在分析前需进行地形填洼处理,形成一个平坦的地形,以减少水流路径分析误差。

水流路径分析的关键在于确定在 DEM 表面,水流流经哪些栅格单元,即每个栅格单元的流出方向,这需要在流向分析的基础上进行。在常规的流向计算中,常用“八方向法”进行度量。“八方向”算法在一定的像元分辨率条件下利用“ 3×3 ”模板进行逐像元扫描计算,以中心像元为基点构建等分辨率宽度向八方向扩展的高程拟合平面,并利用中心像元 8 方向的高程变化率构建算法,分析邻域范围内值变化率最大的下坡方向^[8]。当一像元的邻域存在多个相同的下坡方向值时,会扩大搜索,直到找到更大值。具体计算式如下:

$$\text{MD} = Z_{\max} / \text{distance} \times 100 \quad (2)$$

其中 Z_{\max} 为中心像元与周围 8 邻域像元的高程差最大值, distance 为相邻像元间距离。一区域的流向分析完成后,需要进一步分析地表汇流特征。汇流即从地表水流路径源开始,每经过一个像元,汇流累积量增加 1,计算每个下坡像元的流入累积量,即对于每个像元,有多少的像元是其流入像元。最终汇流的分析结果可以理解为对于一个目标像元,水流流经时携带的上游像元数。在分析结果中,汇流值较大的像元必然处于坡降较大,地势较低处,即为沟壑覆盖的像元。

(3) 汇流路径细化。从式(1)中可以得出,最终汇流提取结果包含的目标栅格数将直接影响沟壑密度分析结果。分析上述汇流提取结果,在地势起伏较大区域,汇流路径的提取结果多为单像元宽度,在地势低洼区,汇流栅格会存在团块状集聚,增大了目标栅格数和该区的沟壑密度,引起分析误差。因此需要对提取结果进行再处理才可以参与最终的沟壑密度计算,特别是团块区。这里使用改进的栅格细化算法进行处理,在基本不破坏栅格拓扑连通性的前提下,采用栅格剥离的方法删除边缘点,提取中心单像元宽度的特征骨架。假设该处理区为多像元宽度提取区, P 为中心像元,对于该像元进行判断分析时,采用“ 3×3 ”

模板,当计算得到 $P_1 + P_3 + P_5 + P_7 = 4$, $P_2 + P_4 + P_6 + P_8 = 4$ (或 0),说明 P 被目标像元包围,则该像元保留。当 $P_3 + P_7 = 0$, $P_2 + P_3 + P_4 > 0$, $P_8 + P_7 + P_6 > 0$ 时,说明 P 点为线状栅格的转折点或延续点,该点保留。当 $P_1 + P_3 = 0$, $P_2 = 1$, $P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 > 0$ 时,说明 P 点为线交叉点,进行保留^[9-10]。通过迭代式的剥离去除,对保留点进行赋值区别处理后累计分析,最终保证提取结果低洼区团块状集聚的栅格细化为单像元宽度的较连续线状栅格,提升分析的合理性。

1.2 分析方法

原始 DEM 存在误差和不合理凹陷,故在进行坡向域计算之前,必须对原始 DEM 进行填洼处理。利用上述方法对填洼后 DEM 进行流向计算,并计算汇流累积量。对汇流累积计算结果进行栅格细化,保证每条水流路径为单像元宽度。将处理结果进行像元二分处理,结合区域高程特征和 DEM 分辨率,选择合理阈值,将小于阈值的汇流累积栅格赋值为“0”,大于阈值的赋值为“1”,“1”值栅格覆盖区即为地表径流路,则可以得到表征沟壑分布的二值化栅格。

对于地形起伏较大区域来说,山谷低洼平坦区和平原区计算沟壑密度会影响分析结果的合理性,因此需要利用相对高程和高程的重分类与栅格像元的逻辑计算来辅助消除这些不合理区。高程即填洼后 DEM 的栅格属性值,相对高程可以通过栅格邻域统计的方法实现。利用一定的统计窗口,逐像元计算统计中心像元在搜索窗口范围内的高程变化值,其结果与窗口大小密切相关。本文中采用“3×3”窗口进行分析。对于高程和相对高程分析结果进行栅格重分类,高程重分类结果主要用于消除平原的不合理提取区,相对高程重分类结果主要用于消除地形起伏较小区和谷地低洼平坦区的沟壑提取结果。两者的重分类是将属性为一定阈值以上的提取结果赋值为“1”,阈值以下的赋值为“0”,将重分类的结果与沟壑二值化栅格分别进行栅格相乘运算。类似于 Intersection 运算,在相乘过程中,高程和相对高程值低于阈值的沟壑像元值会赋值计算为“0”,达到自动去除的目的。

本文中方法计算沟壑密度是根据统计单元中所包含的“1”值像元数来计算各单元中特征线所覆盖面积,再计算出沟壑密度。由于通过上述的多重重分类二值化,提取出的沟壑区目标栅格属性值已全部赋值为“1”,因此通过区域统计工具,创建一定单位面积的统计格网,采用单元求和法,计算每一单元中的特征栅格数,采用下式计算即可获得该统计单元的沟壑密度。

$$GD = \sqrt{G_{\text{sum}} \cdot CS^2 / 1000000} \quad (3)$$

其中 G_{sum} 为 1 km² 统计格网中每一单元所包含的“1”值栅格像元数。在汇流累积二值化阈值,高程

和相对高程重分类阈值的选择上,需要根据实地的地形地貌条件和 DEM 分辨率进行试验分析。下文将以西安市为试验区域,利用上述方法,分析这两者取值对于该区域沟壑密度计算结果的影响。整体的算法流程如下图所示(图 1)。在 ArcGIS 10.2 版本软件中利用 Python 语言调用 Arcpy 函数包,编写沟壑密度分析的脚本工具,该工具通过用户交互输入 DEM 栅格数据,汇流累积二值化阈值,高程重分类阈值,相对高程重分类阈值,目标区域掩膜文件和统计格网矢量文件,运行程序计算结果并保存^[11]。统计格网采用渔网工具(Fishnet)生成覆盖全域的以 1 km² 为单元的规则格网。使用的 DEM 数据为 ASTER GDEM V2 版,空间分辨率为 30 m,投影为 UTM/WGS84,经拼接裁切处理后能够满足西安市全域沟壑密度分析需要。

1.3 试验区概述

本文以西安市市域范围作为试验研究区。西安市位于关中平原中部,整体地貌形势呈南高北低,南部为秦岭山地,北部和西北部分布着大面积渭河及其支流的洪冲积平原,东部区为骊山低山丘陵,境内海拔高度差异悬殊位列全国各城市之冠^[12]。秦岭山地与渭河平原界限分明,构成西安市的地貌主体。在该市东南方向浅山与平原交汇区分布着面积较大的黄土台塬,西部浅山区北麓亦有小面积台塬分布。该市的平原高程多在海拔 450 m 以下,山地海拔在 1 000 m 以上居多,台塬和低山海拔 500 ~ 1 300 m。该市的地貌总体特征主要表现为南部秦岭山体高大,多深沟峡谷地形,山体被南北向多条河流呈梳状切割。山前分布有连片的洪(冲)积扇群,呈波浪形向北倾斜。低山与台塬区沟壑纵横,相对高程变化剧烈,地形最为破碎,其中沟壑发育最密集区主要是在骊山北麓、南麓台塬与秦岭浅山交界区以及蓝田县西部台塬区。综上所述,该区域的地形类型众多,地貌形势复杂多变,中低山、丘陵、台塬、平原皆有分布,适合于对文中的沟壑密度分析算法合理性进行检测。

1.4 关键阈值分析

本文参考试验区自然地理背景条件,对于“汇流累积重分类阈值”,“高程重分类阈值”和“相对高程重分类阈值”三者取值方法进行分析。在利用地表汇流算法进行沟壑密度分析过程中,汇流累积重分类阈值的设置对于最终分析结果有巨大影响。在考虑 DEM 分辨率和区域地形特征的基础上,选择不同的阈值,对提取结果进行沟壑覆盖栅格数对比。阈值最小值设置为 100,最大值设置为 1 000,每隔 50 取值一次,统计分析结果如图 2 所示。分析图中统计曲线和趋势函数可得出,当阈值大于 230 时,曲线斜率开始小于趋势函数斜率,曲线走势趋缓,沟壑覆盖栅格数受汇流累积重分类阈值影响开始降低^[13]。因此,在试验区域的沟壑密度分析中,汇流累积重分类阈值取 230。

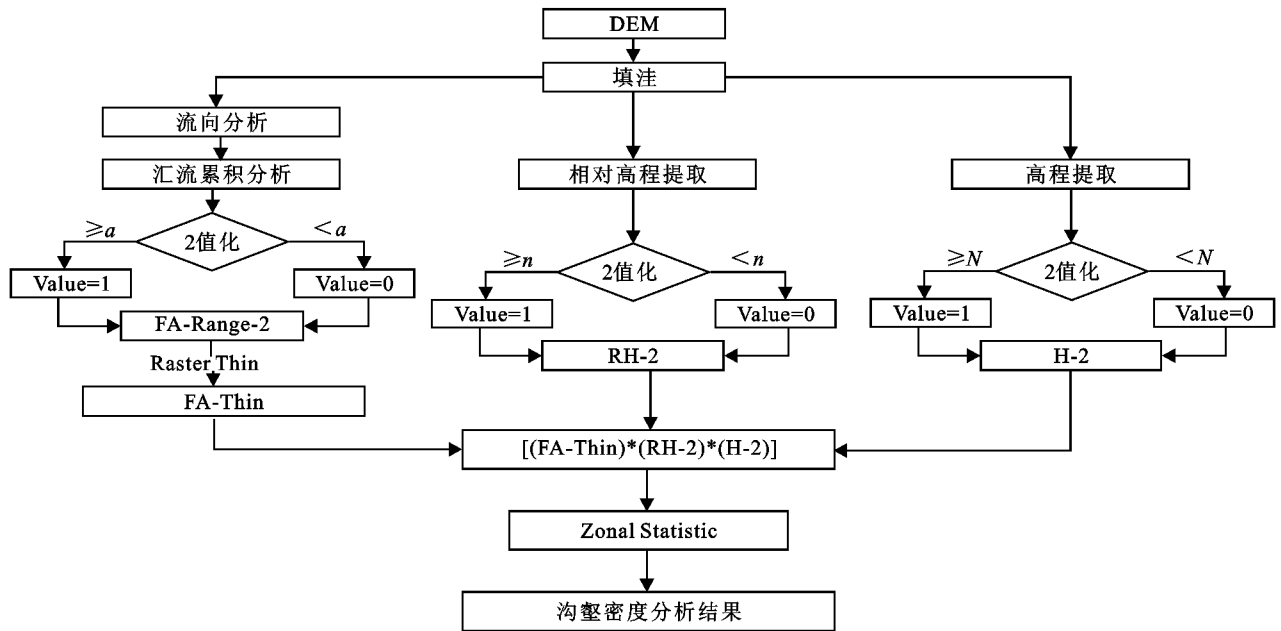


图 1 沟壑密度分析方法示意图

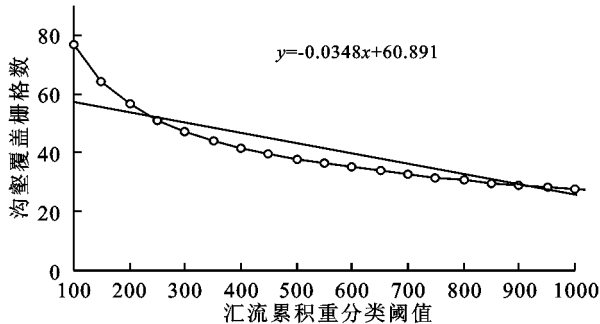


图 2 沟壑覆盖栅格数和阈值关系曲线

综合考虑 DEM 分辨率以及区域地表高程特征,将高程分级阈值设置为 450 m。在计算过程中,海拔低于 450 m 的地表将被认为不存在沟壑,这主要考虑到该市的平原平坦区和地形起伏区的临界高程。如果研究区存在大面积地形平坦区或海拔较低,该值可以近似设定为 0 m,即高程不做重分类处理。在分析中综合高程重分类结果和整体地貌特征,将相对高程的重分类阈值设定在 10 m 以下进行研究。相对高程重分类阈值取 0 时,说明相对高程不做重分类处理。对相对高程设置不同阈值后分析结果例举如表 1 所示,表中还相应分析了不同取值条件下沟壑密度分级后所各等级占据的区域面积比。参考前人的研究成果,西安市的平均沟壑密度为 1.29 km/km^2 ^[14]。当相对高程的重分类阈值取 0 时,该分析方法计算出西安市平均沟壑密度为 1.35 km/km^2 。因此,进行相对高程重分类二值化是必要的,对于地形平坦区进行分析时,该值设为 0 m。对于本研究区域,当该值取 3 m 时,计算结果与前人研究的区域沟壑密度均值基本吻合,因此较为合理。将上述重要参数带入分析程序中,计算该区的沟壑密度。

2 结果与分析

通过 DEM 处理分析和分析参数的设置研究,将汇流累积重分类阈值设置为 230,高程重分类阈值设置为 450 m,相对高程重分类阈值设置为 3 m。将上述参数与区域统计格网,区域矢量图带入分析程序中,分析得到的沟壑分布情况和沟壑密度分析结果(图 3)。

由于西安市范围较大,地形多样,全域沟壑提取结果线划过于复杂,故按照地貌类型例举展示低山丘陵区、秦岭浅山区和洪(冲)击扇区的局部沟壑提取结果,见图 4。结果显示西安市全域平均沟壑密度为 1.29 km/km^2 ,极大值为 3.38 km/km^2 ,极小值为 0 km/km^2 。本分析方法提取结果除雁塔区,其余各行政区统计均值与前人研究结果基本吻合^[14],而且本方法在沟壑密度极值分析上有突破。对比与雁塔区具有相近地貌形态的灞桥区分析结果,并参考该行政区自然地貌统计数据可知,雁塔区中有近 1/3 的地貌类型属于黄土台塬,塬面破碎、丘洼相间,东部被河流深切,塬畔多冲沟发育,水土流失严重^[15]。故可以推断,前人基于人为量算,对于塬区沟壑密度分析结果可能偏小。参考前人研究的沟壑密度分级评价标准,该市沟壑密度大于 2 km/km^2 的区域约占总面积的 36%,其中沟壑密度 $<1 \text{ km/km}^2$ 的区域面积最大,占据总区域面积的 36.78%, $\geq 3 \text{ km/km}^2$ 的区域面积最小,约占据总区域面积的 1.21%。

按照区域行政单元,将沟壑密度按照“ $<1 \text{ km/km}^2$ ”,“ $1\sim 2 \text{ km/km}^2$ ”,“ $2\sim 3 \text{ km/km}^2$ ”,“ $\geq 3 \text{ km/km}^2$ ”分级统计出西安市各区县分布面积比和平均沟壑密度,结果见表 2。通过分析可知,该方法计算得到西安市沟壑密度均值最大县区为蓝田县,处于秦岭与平原交界带的周至县、户县和长安区沟壑密度也较

大。这些区域主要包含了复杂的地貌类型,存在大面积的浅山、台塬区和洪冲积扇,沟壑纵横密布。参考自然地理条件,这些地区的沟壑密度较大,该方法分析结果合理。临潼区和灞桥区的沟壑密度均值较小,但区内的沟壑密度变化范围大,这是由于两区位于台塬低山与平原过渡区,存在大面积平坦地形,沟壑密度均值较小,但台塬低山区沟壑密度大,因此极大值

较大。由于高程重分类因子的加入,位于平原及城市中心地带的未央区、莲湖区、高陵区等区县的沟壑密度参照文中方法分析均为 0 km/km^2 ,符合实地条件,避免了单纯的汇流累积分析带来的结果歧义,保证了分析合理性。北部阎良区的小部分地区位于渭北高原南缘的丘陵沟壑区,沟壑密度较大,通过文中分析方法亦得到较好的分析体现。

表 1 相对高程重分类阈值计算结果对比

重分类 阈值/m	最大值/ ($\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$)	最小值/ ($\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$)	平均值/ ($\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$)	比例/%			
				<1 km/km^2	1~2 km/km^2	2~3 km/km^2	3~5 km/km^2
0.00	3.54	0.00	1.35	36.78	27.06	34.95	1.21
3.00	3.38	0.00	1.29	37.31	30.77	31.43	0.48
5.00	3.23	0.00	1.23	38.59	34.78	26.35	0.29
8.00	3.13	0.00	1.12	43.28	34.95	21.65	0.12
10.00	3.10	0.00	1.04	47.53	34.77	17.67	0.03

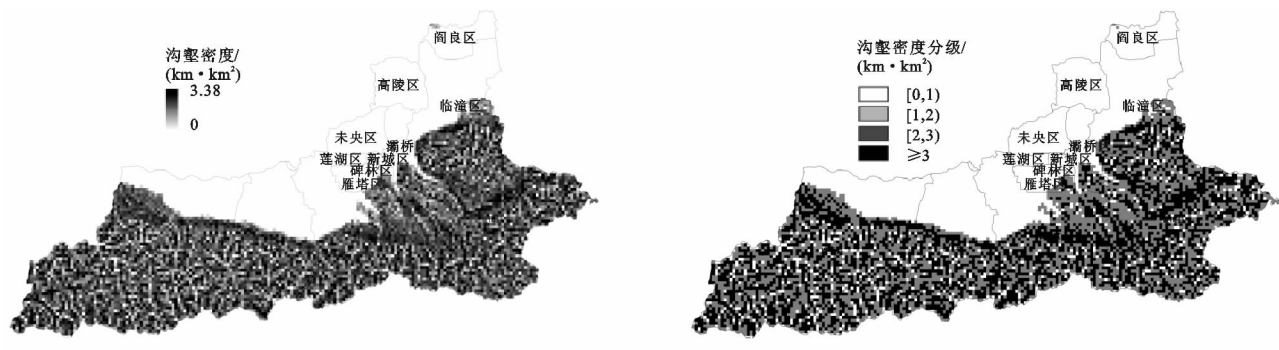


图 3 西安市沟壑密度计算结果

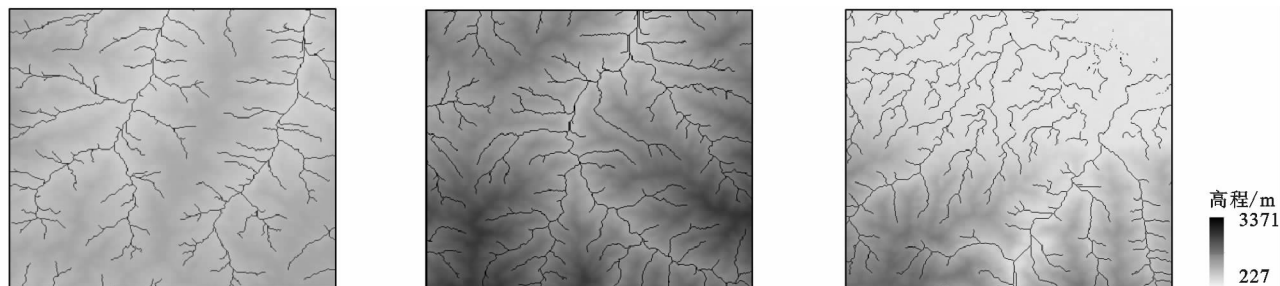


图 4 特征地貌类型区沟壑提取结果

表 2 西安市分区县沟壑密度分级统计

[illegible]

3 结论

本文利用水文分析原理,基于 DEM 分析地表汇流累积量,通过对汇流计算结果进行栅格重分类二值化处理,选择合理阈值,提取出沟道。并考虑研究区实际地貌特征,增加高程和相对高程二值化因子,对沟道提取结果进行优化。并利用构建 1 km^2 单元统计格网的方法,逐格统计目标栅格数并计算出研究区的沟壑密度。该方法有如下特征:

(1)能够实现大范围沟壑密度的快速较精确计算,同时可以体现区域地表与统计格网同尺度的地表沟壑密度变化趋势,方便地获取适合于特定分析需要的沟壑密度均值,极值等量值信息。在计算过程中,不需要对于分析数据进行过多人为干预和删改,实现效率较高,同时具有客观性。

(2)在沟壑密度计算过程中,利用公式的简单变形,将原先基于矢量图形的计算变为利用格网统计特征栅格数量方法,避免了沟道提取结果的栅矢转化误差和转化后歧异图形的出现。

(3)运用逻辑判断原理,基于一定的分析模板,将高程和相对高程进行重分类二值化,并对沟道提取结果进行栅格求积处理。通过该步骤可以实现低海拔平坦区沟壑密度计算异常值的剔除,考虑了区域的实际地貌特征,提升计算合理性。

该方法的处理过程涉及到分析窗口大小的选择,高程和相对高程重分类阈值的分析以及沟道提取栅格结果的细化。其中重分类阈值的选择对于最终沟壑密度分析结果具有较大影响。如何优化这一分析过程仍需进一步研究。由于格网是规则的,而研究区边界会被格网切割。因此在利用该方法进行沟壑密度分析时还需注意参与分析的 DEM 数据覆盖范围应当适当大于统计格网范围,如果与目标区等同,则在后期的格网统计时,边缘部分所在的格网统计结果会明显小于邻域结果,造成分析结果不合理。参考研究区试验结果,该方法在合理的参数设置条件下,分析得到的沟壑密度结果符合区域实际,可以较为准确地体现样区

的沟壑密度变化趋势,具有高效性和适用性。

参考文献:

- [1] 熊汉江,李秀娟.一种提取山脊线和山谷线的新方法[J].武汉大学学报:信息科学版,2015,40(4):498-502.
- [2] 靳海亮,康建荣,高井祥.利用等高线数据提取山脊(谷)线算法研究[J].武汉大学学报:信息科学版,2005,30(9):809-812.
- [3] 赵鹏,张立朝,张文诗,等.一种利用地形曲率提取地表沟道算法[J].测绘科学技术学报,2014(1):13-17.
- [4] 方磊,刘文兆,李怀有.基于 GIS 的黄土高原沟壑区砚瓦川流域地形特征提取与分析[J].水土保持研究,2010,17(3):7-11.
- [5] 曾红伟,李丽娟,柳玉梅,等. Arc Hydro Tools 及多源 DEM 提取河网与精度分析:以洮儿河流域为例[J].地球信息科学学报,2011,13(1):22-31.
- [6] 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.
- [7] 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(3):225-242.
- [8] Smith M J D, Goodchild M F, Longley P. Geospatial analysis: A Comprehensive Guide to Principles, Techniques and Software Tools[M]. Winchelsea, UK: The Winchelsea Press, 2015.
- [9] 张欣,陈国雄,钟耳顺.优化栅格细化算法的线状地物提取[J].地球信息科学学报,2007,9(3):25-27.
- [10] 郭邦梅,王涛,赵荣,等.面状要素骨架线提取算法的研究[J].测绘通报,2010(12):17-19.
- [11] Pimpler E. Programming ArcGIS10.1 with Python Cookbook [M]. Birmingham U K: Packt Publishing, 2013.
- [12] 宋德明,阴治农,马正林,等.西安市地理志[M].西安:陕西人民出版社,1988.
- [13] 李俊,汤国安,张婷,等.利用 DEM 提取陕北黄土高原沟谷网络的汇流阈值研究[J].水土保持通报,2007,27(2):75-78.
- [14] 马钟彦.西安市水利志[M].西安:陕西人民出版社,1999.
- [15] 西安市雁塔区地方志编纂委员会.雁塔区志[M].西安:三秦出版社,2003.