

基于 DEM 的四川省低山丘陵区坡度 提取不确定性分析

胡卓玮 李 洋* 王志恒

(1. 首都师范大学 资源环境与旅游学院 北京 100048; 2. 资源环境与地理信息系统北京市重点实验室 北京 100048;
3. 灾害评估与风险防范民政部重点实验室 北京 100048)

摘 要: 针对四川省低山丘陵区,以 GIS 为技术支撑,深入分析研究区坡度提取的不确定性。以平均坡度代表区域坡度的一般水平,采用 6 种地貌类型的 12 组不同分辨率的 DEM 数据,研究平均坡度与 DEM 空间分辨率、区域地貌特征的关系,定量分析基于 DEM 提取坡度的不确定性。结果表明,研究区不同地貌单元内,平均坡度随着 DEM 分辨率的减小而减小,呈现出很强的线性变化规律,其衰减速率基本不变;其回归方程的常数项与所在地貌单元的沟壑密度呈显著的二次曲线变化特征;坡度提取的精度与 DEM 的空间分辨率成正相关关系。

关键词: DEM; 坡度; 不确定性; 四川省低山丘陵区

中图分类号: P931.91

文献标识码: A

地形因子反映了地形地貌的固有特征,而区域内的地形地貌特征控制着滑坡的空间分布。坡度是地貌学中描述地貌形态的两个重要地形因子之一,与区域滑坡发生和分布存在良好的相关性^[1]。

在地形起伏变化比较剧烈区域,DEM 对地形描述的精度受空间分辨率影响很大^[2],直接导致基于不同分辨率 DEM 提取的坡度也各不相同^[3],因此,了解坡度提取误差的成因、大小和空间分布规律有利于提高坡度提取的精度。

国内许多学者在坡度提取不确定性方面做了大量的研究工作。汤国安等^[3]以陕北黄土高原 6 个典型地貌类型为实验区域,采用野外实测和 1: 1 万比例 DEM 为基础数据,研究 DEM 栅格分辨率及地形粗糙度对 DEM 提取的地面平均坡度精度的影响。刘敏等^[4]以陕西省 1: 5 万比例尺 25 m 分辨率的 DEM 数据为信息源,共 671 幅,分析 DEM 空间分辨率对提取坡度信息的不确定性影响。刘红艳等^[5]基于数字地形分析和常规统计方法,研究县南沟流域 DEM 水平分辨率与坡度之间的关系。

本文在前人研究工作的基础上,以四川省低山丘陵区为研究区,研究 DEM 空间分辨率对提取该区域坡度信息的不确定性影响。

1 研究区概况

四川省低山丘陵区位于东部,地处 27.9° ~ 32.4°N, 102.9° ~ 108.1°E,大部分地区的海拔在 1 000 m 以下。研究区的面积为 $1.12 \times 10^5 \text{ km}^2$,占四川省总面积的 23%,如图 1 所示。

研究区内的行政单元主要包括:成都市、自贡市、泸州市、德阳市、绵阳市、广元市、遂宁市、内江市、乐山市、南充市、眉山市、宜宾市、广安市、达州市、雅安市、巴中市、资阳市、凉山彝族自治州等 18 个市(自治州)。

2 坡度提取及其不确定性分析

2.1 坡度提取算法

收稿日期(Received date): 2012 - 02 - 16; 改回日期(Accepted): 2012 - 05 - 29。

作者简介(Biography): 胡卓玮 (1979 -), 男,汉族,江西景德镇人,博士,副教授。[Hu Zhuowei (1979 -), male, the Han nationality, born in Jingdezhen of Jiangxi, doctor, adjunct professor.] E-mail: huzhuowei@gmail.com

* 通讯作者(Corresponding author): 硕士生, E-mail: liyang0320@foxmail.com

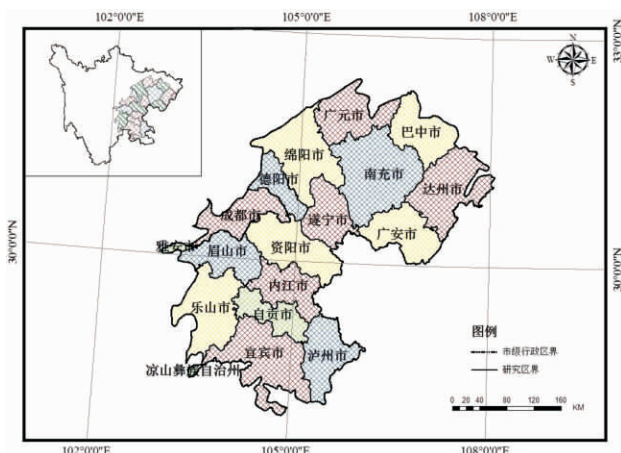


图1 四川省低山丘陵区空间分布图

Fig.1 The spatial distribution map of the hilly area of Sichuan Province

地面某点的坡度是过该点的切平面与水平地面的夹角,是高度的变化的最大值比率,表达了地表面在该点的倾斜程度。地面每一点都有坡度,它是点上概念,而不是一个面上的概念^[6]。当地形曲面 $H=f(x,y)$ 已知时,可通过下列公式计算给定点的坡度^[7]

$$\text{Slope} = \arctan(\sqrt{f_x^2 + f_y^2}) \quad (1)$$

式中 f_x 是 X 方向高程变化率 f_y 是 Y 方向高程变化率。

如式(1)所示,求解地面某点坡度的关键是求解 f_x 和 f_y 。DEM 是以离散形式表示的地形曲面,而且在多数情况下曲面函数是未知的,因此在 DEM 上对 f_x 和 f_y 的求解,一般是在局部范围(3×3 移动窗口)内,通过给格网点一定编号,利用数值微分方法或局部曲面拟合方法进行。

目前,计算坡度的算法有很多种。周启明等^[7]详细总结了目前常用的基于格网 DEM 进行坡度提取的算法,如表1所示。

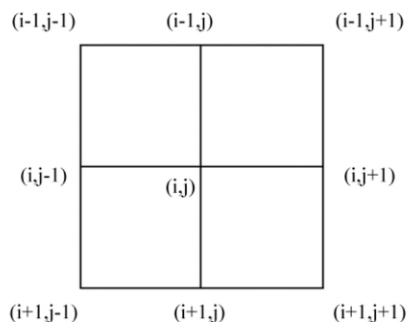


图2 三阶差分计算示意图

Fig.2 Schematic diagram of 3rd order finite difference

表1 基于格网 DEM 上 3×3 局部移动窗口的坡度提取算法统计表^[7]

Table 1 Slope extraction algorithm statistical table of three by three local mobile window based on grid DEM

数值分析法	最大坡降算法		
	简单差分算法		
	二阶差分		
	边框差分		
	三阶差分	不带权 带权	
局部曲面拟合法	线性回归平面		
	二次曲面	限制性	不带权 带权
		非限制性	不带权 带权
		不完全四次曲面	
	空间矢量法		
快速傅里叶变换			

本文基于 ArcGIS 平台,采用三阶差分算法(3rd order finite difference, 3FD)(图2)计算 f_x 和 f_y 。计算公式如下

$$f_x = \frac{(z_{i+1,j-1} + 2z_{i,j} + z_{i-1,j+1} - z_{i-1,j-1} - 2z_{i,j} - z_{i+1,j+1})}{8d} \quad (2)$$

$$f_y = \frac{(z_{i+1,j-1} + 2z_{i,j} + z_{i-1,j+1} - z_{i-1,j-1} - 2z_{i,j-1} - z_{i+1,j-1})}{8d} \quad (3)$$

式(2)和(3)中, d 为格网距离。通过上式可以看出 f_x 和 f_y 的精度主要受 DEM 格网分辨率 d 的影响。

2.2 不确定性分析

在四川省低山丘陵区坡度提取的不确定分析中,采用平均坡度表征研究区坡度的一般水平,进而对在不同 DEM 分辨率下提取的坡度进行比较分析。

算术平均数代表数据集的平均水平,不受总体范围的影响,因此具有比较分析的作用,还可作为评价事物的客观标准^[8],因此,平均坡度可以作为衡量一个地区地形复杂程度的重要指标^[3]。

2.2.1 实验流程

本文选取覆盖四川省低山丘陵区的,空间分辨率为 30 m 的 GDEM(Global Digital Elevation Model) 为数据源,深入分析 DEM 空间分辨率对坡度提取不确定性的影响。实验流程如下所述:

1. 基于研究区地貌类型分布图,将整个研究区划分为低海拔冲积洪积台地、低海拔冲积平原、低海拔丘陵、低海拔剥蚀台地、低海拔小起伏山地、低海拔中起伏山地等 6 种地貌类型区域。

2. 在 ArcGIS 平台下,对 30 m 分辨率的 DEM 分别重采样成 35 m, 40 m, 45 m, 50 m, 55 m, 60 m, 65 m, 70 m, 75 m, 80 m, 85 m 共 12 组,对每种分辨率 DEM 数据分别提取其坡度值,并计算上述 6 种地貌类型区域内的平均坡度,如表 2 所示。

3. 以 DEM 分辨率为横坐标,6 种地貌类型区域内的平均坡度值为纵坐标,制作散点图,通过拟合求解回归方程系数和常数项。

4. 提取不同地貌类型区域内的沟壑密度。沟壑密度指单位面积内沟壑的总长度,是描述地面切割破碎程度的一个术语,是反映区域地形地貌的一个基本指标,其提取流程如图 3 所示。

本文尝试采用沟壑密度与拟合方程的常数项进行拟合,进而建立平均坡度与 DEM 分辨率、区域地貌特征的关系,定量分析基于 DEM 提取坡度的不确定性。

2.2.2 平均坡度变异特征分析

以 DEM 空间分辨率为自变量,对应的平均坡度值为因变量,对 6 个地貌类型区域内的平均坡度进行回归分析。分析结果显示,平均坡度随 DEM 分辨率的减小,呈现出很强的线性变化规律,如图 4 所示。

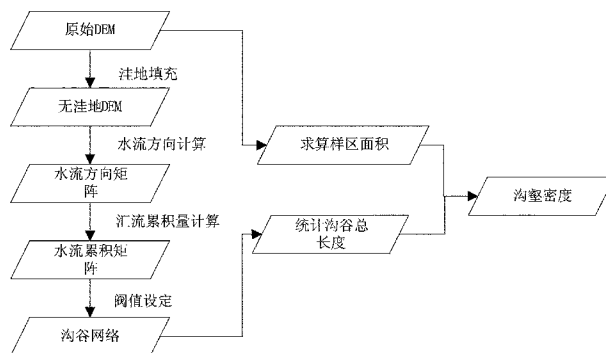


图 3 沟壑密度计算流程图

Fig. 3 The calculation flow chart of Gully density

设通用的变化曲线为一元一次方程,如式 (4) 所示

$$y = ax + b \quad (4)$$

式中 x 为 DEM 分辨率, a 和 b 为回归方程系数,则不同地貌类型区域内的回归方程为

$$\begin{aligned}
 y &= -0.0232x + 15.087 & (\text{低海拔中起伏山地}) \\
 y &= -0.0219x + 12.624 & (\text{低海拔小起伏山地}) \\
 y &= -0.0216x + 8.5331 & (\text{低海拔剥蚀台地}) \\
 y &= -0.0235x + 7.5181 & (\text{低海拔丘陵}) \\
 y &= -0.0236x + 6.3265 & (\text{低海拔冲积平原}) \\
 y &= -0.025x + 5.6977 & (\text{低海拔冲积洪积台地})
 \end{aligned} \quad (5)$$

通过对 6 种地貌类型区域内的平均坡度回归方程分析,如式 (5) 所示,可以看出:

表 2 不同分辨率 DEM 所提取的地面平均坡度汇总表

Table 2 The summary table of the average ground slope by the extraction of different resolution of DEM

空间分辨率 /m	地貌类型					
	低海拔冲积洪积台地	低海拔冲积平原	低海拔丘陵	低海拔剥蚀台地	低海拔小起伏山地	低海拔中起伏山地
30	4.959 6	5.644 1	6.798 3	7.887 7	11.964 3	14.325 1
35	4.832 3	5.474 2	6.688 8	7.752 9	11.847 4	14.353 6
40	4.700 6	5.420 7	6.580 8	7.760 4	11.751 6	14.139 6
45	4.564 9	5.267 8	6.472 7	7.556 2	11.643 4	14.036 5
50	4.435 1	5.092 0	6.357 5	7.447 2	11.533 3	13.916 8
55	4.311 7	5.060 1	6.232 3	7.313 4	11.413 7	13.813 4
60	4.197 4	4.909 8	6.123 7	7.199 9	11.328 5	13.713 9
65	4.064 9	4.759 3	5.976 3	7.055 7	11.206 1	13.579 6
70	3.937 0	4.676 3	5.875 1	7.032 2	11.105 2	13.463 5
75	3.823 7	4.521 3	5.760 0	6.889 7	10.992 9	13.346 7
80	3.700 5	4.438 2	5.631 1	6.948 4	10.850 6	13.219 6
85	3.589 3	4.369 2	5.518 9	6.646 9	10.762 1	13.097 1

1. 各回归方程中的曲率 a_i ($i=1, 2, 3, 4, 5, 6$) 基本一致, 故可取其平均值 $\bar{a} = \sum_{i=1}^6 a_i$ 作为研究区平均坡度回归方程的曲率。

2. 各回归方程中的常数项 b_i ($i=1, 2, 3, 4, 5, 6$) 与相应地貌单元区域中的沟壑密度呈显著二次曲线变化特征, 如图5所示。

通过拟合, 回归方程如下所示

$$y = 0.0039x^2 - 0.1020x + 3.6724 \quad (6)$$

式中 y 为式(5)的常数项, x 为不同地貌类型区域内的沟壑密度。则四川省低山丘陵区平均坡度的变异特征可通过下式来表征

$$y = -0.0231x + (0.0039S^2 - 0.1024S + 3.6724) \quad (7)$$

式中 x 为 DEM 的空间分辨率, y 为该空间分辨率的 DEM 所提取的地面坡度值, S 为地面沟壑密度。

设 30 m 分辨率的 DEM 所提取的地面平均坡

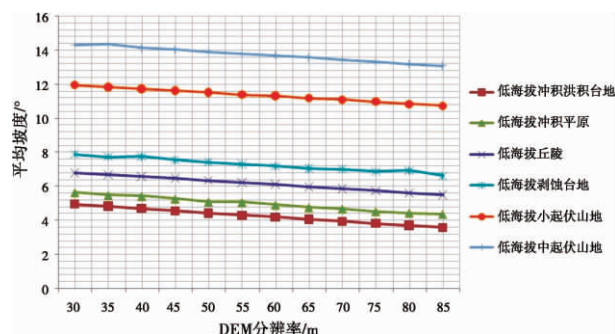


图4 不同样区及分辨率的平均坡度回归示意图

Fig. 4 The regression schematic diagram of the average slope of different areas and resolution

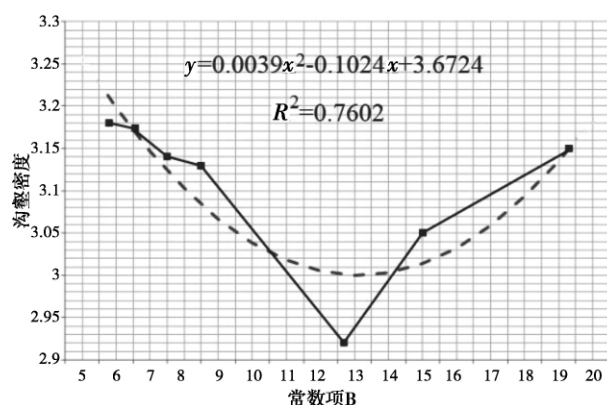


图5 常数项B与研究区不同地貌单元沟壑密度 km^2/km^2 关系图

Fig. 5 The diagram between constant term B and different geomorphic units gully density in the study area

度 Y 为真值, 则在其他分辨率 x 所提取的地面平均坡度的误差 E 为

$$E = Y - y = 0.0231x - 0.693 \quad (8)$$

式中 E 即为四川省低山丘陵区平均坡度的误差估算模型。

通过上式可知, 在四川省低山丘陵区, 坡度提取的精度与 DEM 的空间分辨率关系成正相关。DEM 空间分辨率越高, 坡度提取的精度也越高。

3 结论

本文选择四川省低山丘陵区作为研究区, 以 GIS 为技术支撑, 深入分析坡度提取的不确定。研究区不同地貌单元内, 平均坡度值随 DEM 空间分辨率的减小而减小, 且呈现出很强的线性变化规律, 其衰减速率(直线斜率)基本不变; 其回归方程的常数项与所在地貌单元的沟壑密度呈显著地二次曲线变化特征; 坡度提取的精度与 DEM 的空间分辨率成正相关关系。

参考文献 (References)

- [1] Guo Fangfang, Yang Nong, Meng Hui, et al. Application of the relief amplitude and slope analysis to regional landslide hazard assessments [J]. *Geology in China*, 2008, 35(1): 131-143 [郭芳芳, 杨农, 孟晖, 等. 地形起伏度和坡度分析在区域滑坡灾害评价中的应用 [J]. *中国地质*, 2008, 35(1): 131-143]
- [2] Tang Guo'an, Gong Jianya, Chen Zhengjiang, et al. A simulation on the accuracy of DEM terrain representation [J]. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 2001, 30(4): 361-365 [汤国安, 龚健雅, 陈正江, 等. 数字高程模型地形描述精度量化模拟研究 [J]. *测绘学报*, 2001, 30(4): 361-365]
- [3] Tang Guo'an, Zhao Mudan, Li Tianwen, et al. Modeling slope uncertainty derived from DEMs in Loess Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(6): 824-830 [汤国安, 赵牡丹, 李天文, 等. DEM 提取黄土高原地面坡度的不确定性 [J]. *地理学报*, 2003, 58(6): 824-830]
- [4] Liu Min, Tang Guo'an, Wang Chun, et al. Analysis of the slope uncertainty derived from DEMs [J]. *Geo-Information Science*, 2007, 19(2): 65-69 [刘敏, 汤国安, 王春, 等. DEM 提取坡度信息的不确定性分析 [J]. *地球信息科学*, 2007, 19(2): 65-69]
- [5] Liu Hongyan, Yang Qinke, Ning Liang, et al. Relationships between DEM-derived slope and horizontal resolution [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17(4): 34-37 [刘红艳, 杨勤科, 牛亮, 等. 坡度与水平分辨率关系的初步研究 [J]. *水土保持研究*, 2010, 17(4): 34-37]
- [6] Su Qiang. Research on loess landslide hazard zonation based on DEM [D]. China University of Geosciences (Beijing), 2006 [苏强. 基于 DEM 的黄土滑坡危险性评价研究 [D]. 中国地质大学(北京),

- 2006]
- [7] Zhou Qiming , Liu Xuejun. Digital terrain analysis[M]. Beijing: Science Press 2008 [周启明 ,刘学军. 数字地形分析[M]. 北京: 科学出版社 ,2008]
- [8] Tang Guo'an , Liu Xuejun , Lv Guonian. Digital elevation model and Earth analysis of the principles and methods [M]. Beijing: Science Press 2005 [汤国安 ,刘学军 ,闫国年. 数字高程模型及地学分析的原理与方法[M]. 北京: 科学出版社 ,2005]

Uncertainty Analysis Extracting from the Slope of Hilly Area of Sichuan Province Based on DEM

HU Zhuowei , LI Yang , WANG Zhiheng

(1. College of Resources Environment and Tourism , Capital Normal University , Beijing 100048 , China;

2. Key Lab of Resources Environment and GIS , Beijing 100048 China;

3. Key Laboratory of Integrated Disaster Assessment and Risk Governance of the Ministry of Civil Affairs , Beijing 100048 , China)

Abstract: In allusion to the hilly area of Sichuan Province , the paper analyzes the uncertainty of slope extraction deeply based on the GIS technology , taking the average as the general level of the regional slope , using the different resolution DEM data of six physiognomy types in 12 groups , which aims to study on the relationship of average slope and DEM spatial resolution , the regional topographic features , and to the quantitatively analyze the uncertainty extracting from the slope based on DEM. It first shows in different landform units of the study area , the average slope reduces with the decrease of the DEM resolution , which shows an obvious linear variation and the attenuation rate is almost stable. In addition , between the constant term of its regression equation and the ravine density of landform unit to which it belongs , there is a significant characteristic of quadratic section change. It also presents a direct correlation between the accuracy of slope extraction and DEM spatial resolution

Key words: DEM; slope; uncertainty; hilly area of Sichuan province