

# 不同地貌类型坡度提取算法的比较

何振芳, 赵牡丹, 韩羽

(西北大学 城市与资源学系, 陕西 西安 710069)

**摘要:** 分别选取陕北延川、贵州省黔西南牛场、河北省井径县作为黄土地貌、喀斯特地貌以及低山丘陵地貌的典型样区, 并建立该样区的 1: 1 万, 5 m 分辨率的 DEM。采用简单差分、二阶差分、Frame 差分、三阶不带权差分、三阶反距离平方权差分(Horn 算法)、三阶反距离权差分 6 种算法提取坡度, 对不同算法提取坡度的信息进行对比研究, 并分析了不同算法提取坡度产生差异的原因, 确定了适合不同地貌的算法。结果表明, 在不同的地貌类型上使用 8 个邻接单元的算法精度总高于使用 2 个或 4 个邻接单元的算法, 其中三阶反距离平方权差分(Horn 算法)与三阶反距离权差分在所研究的 3 种地貌类型上均是比较合适的。

**关键词:** 数字高程模型 DEM; 坡度; 中误差

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2008)06-0126-04

中图分类号: TP751.1

## Comparison of Extracting Slope Algorithms in Different Types of Landscape

HE Zhenfang, ZHAO Mudan, HAN Yu

(Department of Urban and Resources, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China)

**Abstract:** Yanchuan County of North Shaanxi Province, Niuchang of Southwest Guizhou Province, and Jingjing County of Hebei Province are selected as the typical areas of the loess landscape, karst landform, and hilly landform, respectively. DEM is taken as the research object in the three landform areas with spatial resolution of 5 m according to the map scale of 1: 10 000. Six slope algorithms to extract slope are used and comparison analysis is made to identify suitable algorithms for different landforms. Results show that the reasonable algorithms are three order inverse distance square weight difference and three order inverse distance weight difference. The accuracy of the algorithm using eight adjacent units is higher than the algorithm using two or four adjacent units.

**Keywords:** DEM; slope; median error

由数字高程模型(DEM)能派生出各种地形因子如坡度、坡向、平面曲率、剖面曲率、汇水面积等。其中坡度是最重要的地形因子之一,它影响着地表物质运动和能量转换的规模和强度,不但能够间接表示地形的起伏形态和结构,而且是水文模型、滑坡监测与分析、地表物质运动、土壤侵蚀、土地利用规划等地质学分析模型的基础数据<sup>[1-2]</sup>。

自 DEM 理论形成以来,人们就对坡度精度及计算坡度的方法行了大量的研究和实验。从不同地形复杂度方面,李天文、刘学军等人研究了地形复杂度对坡度精度的影响,并提出了坡度坡向误差主要分布在地形平坦区<sup>[3]</sup>。Carter 等人研究了分辨率和精度对坡度的影响<sup>[4-5]</sup>。在不同的样区内 Skidmore 等人,对不同算法提取坡度精度作过比较<sup>[6-7]</sup> 得出了不

同的结论<sup>[8-9]</sup>。从不同比例尺、不同分辨率方面,汤国安、赵牡丹等人研究了 DEM 提取坡度的精度<sup>[10]</sup>。刘学军分析了坡度算法的精度<sup>[11]</sup>,赵牡丹分析了地面平均坡度的误差<sup>[12]</sup>。陈楠、王钦敏等人研究了黄土丘陵沟壑区坡度算法的选取,并提出了三阶反距离平方权差分和三阶反距离权差分是黄土丘陵沟壑区比较合适的算法<sup>[13-14]</sup>。但是已有研究少见在黄土地貌、喀斯特以及低山丘陵等多地貌类型上研究适合不同地貌类型的坡度算法。本文面向实际应用,探索了适合不同地貌类型的坡度提示算法。

### 1 常见坡度算法

坡度是地面特定区域高度变化比率的量度<sup>[2]</sup>,地面上某点的坡度是表示地表面在该点倾斜程度的一

收稿日期: 2008-04-04

修回日期: 2008-08-30

资助项目: 国家自然科学基金(40301027)“基于 DEM 的区域水土流失地形因子研究”

作者简介: 何振芳(1983-),女(汉族),山东省泰安市人,硕士研究生,研究方向为遥感与地理信息系统。E-mail: hzfwy@163.com。

通信作者: 赵牡丹(1969-),女(汉族),陕西省富平县人,副教授,研究方向为遥感与地理信息系统。E-mail: zmdan@nwu.edu.cn。

个量, 坡度的计算公式为: 当地形曲面  $H = f(x, y)$  已知时, 某给定点的坡度为(均以度为单位)  $\beta = \arctan \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$ , 式中  $f_x$  是东西方向高程变化率,  $f_y$  是南北方向高程变化率。本研究根据 Borrough P. A. 提出的窗口分析法计算坡度<sup>[10, 14]</sup>。考虑到算法的通用性和适用范围, 本文选择了 6 种常用的坡度算法进行分析, 表 1 中的  $g$  为网格分辨率,  $Z_i (i = 1, 2, \dots, 9)$  为中心点 5 周围各格网点的高程, 上式中的  $f_x, f_y$  均是对图 1 中的中心点 5 的计算而言的。

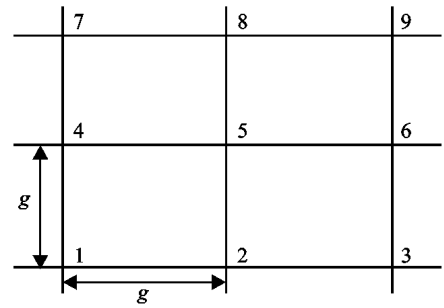


图 1 DEM 3\* 3 局部移动窗口

表 1 常用的 6 种坡度算法

编号	算法	$f(x)$	$f(y)$
1	简单差分	$(Z_5 - Z_2) / g$	$(Z_5 - Z_4) / g$
2	二阶差分	$(Z_8 - Z_2) / 2g$	$(Z_6 - Z_4) / 2g$
3	Frame 差分	$(Z_7 - Z_1 + Z_9 - Z_3) / 4g$	$(Z_3 - Z_1 + Z_9 - Z_7) / 4g$
4	三阶不带权差分	$(Z_7 - Z_1 + Z_8 - Z_2 + Z_9 - Z_3) / 6g$	$(Z_3 - Z_1 + Z_6 - Z_4 + Z_9 - Z_7) / 6g$
5	三阶反距离平方权差分	$(Z_7 - Z_1 + 2(Z_8 - Z_2) + Z_9 - Z_3) / 8g$	$(Z_3 - Z_1 + 2(Z_6 - Z_4) + Z_9 - Z_7) / 8g$
6	三阶反距离权差分	$(Z_7 - Z_1 + 2(Z_8 - Z_2) + Z_9 - Z_3) / (4 + 2\sqrt{2}g)$	$(Z_3 - Z_1 + 2(Z_6 - Z_4) + Z_9 - Z_7) / (4 + 2\sqrt{2}g)$

## 2 实验研究基础

### 2.1 实验样区

本实验选择陕西省延川县、贵州省黔西县南牛场、河北省井径县为研究区, 分别代表黄土地貌、喀斯特、低山丘陵。黄土地貌是黄土塬、梁、峁、沟壑发育典型的地区。我国是喀斯特地貌发育较完全分布较广的国家之一, 碳酸盐类岩石分布面积约  $1.30 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 约占全国总面积的 1/7, 贵州省黔西县南牛场是比较典型的喀斯特地貌。丘陵常和低山相连称为低山丘陵, 河北省井径县是典型的低山丘陵地貌。所选

3 个试验样区都具有很强的地形地貌代表性, 有利于比较不同算法差异, 确定不同地貌的合适算法。表 2 为实验样区地形特征。

### 2.2 实验数据及实验方法

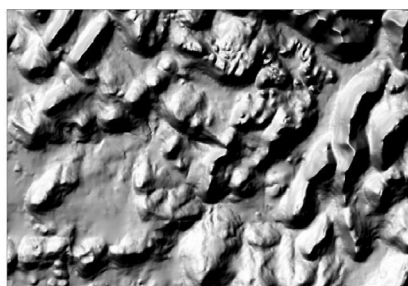
本实验采用国家测绘部门编制的 1: 10 000 地形图 J49G079032, G48G058059, J50G049004 作为基本信息源, 包括等高线、高程点和河流, 按照国家测绘局所制定的地形图数字化技术规范标准完成样区的水平栅格分辨率为  $5 * 5 \text{ m}$  的 DEM。该数据能够比较真实地表达实际地形特征, 利于比较不同算法提取坡度的差异和规律。图 2 为 3 个实验样区的光照模拟图。

表 2 实验样区地形特征

样区编号	样区名称	样区所属地貌类型	平均海拔 / m	地面平均坡度 / (°)	地面粗糙度
1	陕北延川	黄土梁峁状丘陵沟壑区	1 088.90	31.31	1.22
2	贵州黔西南	喀斯特地貌	1 204.20	20.70	1.13
3	河北张家口	低山丘陵	359.75	17.58	1.09



a 黄土地貌



b 喀斯特地貌



c 低山丘陵

图 2 实验样区光照模拟图

通过编程实现 6 种坡度算法,在 ArcGIS 中对坡度进行重新分类。为了比较 6 种不同坡度算法,以  $0^{\circ} \sim 3^{\circ}$ ,  $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$ ,  $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ ,  $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ ,  $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ ,  $20^{\circ} \sim 25^{\circ}$ ,  $25^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ,  $30^{\circ} \sim 35^{\circ}$ ,  $35^{\circ} \sim 40^{\circ}$ ,  $40^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ,  $45^{\circ} \sim 50^{\circ}$ ,  $50^{\circ} \sim 55^{\circ}$ ,  $55^{\circ} \sim 90^{\circ}$  为标准将坡度分为 13 个等级,并将以上级别依次记为 1—13 等级,然后在 Excel 中进行统计分析。并在 ArcGIS 下计算坡度的中误差。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 不同算法提取坡度面积百分比趋势分析及对比分析

面积百分比为每个坡度级别上面积占该样区总面积的百分数,表示每个坡度级别出现的频率;在同一样区上比较 6 种算法各坡度级别出现的频率,从而比较坡度提取算法的差异。从比较结果可以看出,各算法在同一样区上的坡度面积百分比曲线变化的趋势非常相似,而在不同的地貌类型上曲线变化趋势又有所不同,说明不管地形如何变化,6 种算法均可以正确反映坡度的变化趋势;不同算法虽然提取的坡度结果不同,但并没有改变地形的内在规律。因此在做地形特征的可视化和地形分类时 6 种算法任选一种均可以;但做以数值计算为主的地学分析时,不同算法对计算结果会有显著的影响,需要选取其中更精确的算法。

6 种算法都能正确反映出坡度的大体趋势,可以将各算法所得坡度面积百分比的平均值作为用于检验的标准,计算各算法计算结果与这一标准的差值,差值越大说明算法出现极端情况的可能越大,不是合适的算法。

图 3—5 为各算法所得坡度面积百分比与标准值的差值图,通过分析图中坡度面积百分比偏离标准值的情况可以看出,算法 5 和 6 在不同地貌各坡度级别上都是偏离平均值较小的,并且没有出现偏离的极大或极小值,而算法 1 和 3 在各地貌类型上均是偏离比较大的两种算法,都出现了偏离极端值,算法 2 和算法 4 次之。

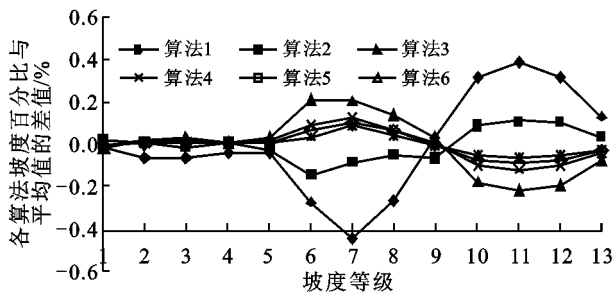


图 3 黄土地貌各等级坡度百分比与平均值百分比差值

综合以上分析可知,在不同地貌上算法 5 和 6 所提取的各个级别的坡度面积均处于中等水平,与平均值差值最小,可以避免提取坡度极端情况的出现,是黄土地貌、喀斯特、低山丘陵地貌上较合适的算法。

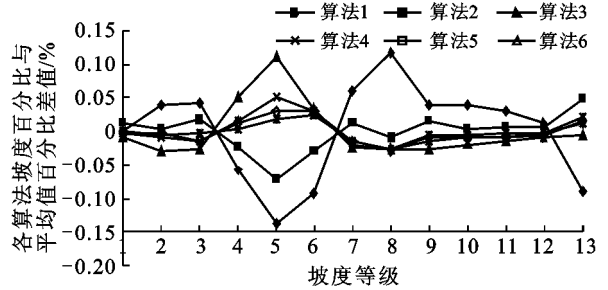


图 4 喀斯特地貌各等级坡度百分比与平均值百分比差值

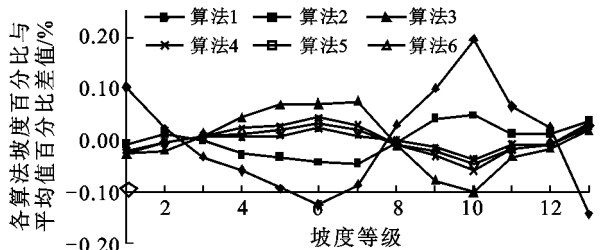


图 5 低山丘陵地貌各等级坡度百分比与平均值百分比差值

#### 3.2 各算法提取坡度中误差及坡度统计指标的分析

6 种算法都能正确反映出坡度的大体趋势,可以将各算法所得坡度的平均值作为检验的标准,评价提取坡度的精确程度。采用中误差分析,参照 DEM 精度评定的检查点方法定义中误差的计算公式<sup>[14]</sup>:假设用于检验的标准坡度矩阵为  $Z_k (k = 1, 2, \dots, n)$ ,由某种算法提取的坡度矩阵在该点的坡度为  $R_k$ ,  $k$  为样区的栅格数。则坡度的中误差公式为

$$\sigma = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (R_k - Z_k)^2 \quad (2)$$

从表 3 中纵向比较可以看出,算法 1 中误差明显高于其它算法,算法 2, 3 中误差差别不大但均高于算法 4, 5, 6, 而算法 4, 5, 6 的中误差差别不大。这是因为算法 1 采用直接与中心点邻接的两个单元,算法 2, 3 采用直接与中心邻接的 4 个单元,算法 4, 5, 6 均使用 8 个邻接单元,因此可以看出在不同的地貌类型上使用 8 个邻接单元的算法精度总高于使用 2 个或 4 个邻接单元的算法。而在 3 个不同的样区上算法 6 都是中误差最小的一种算法,算法 4, 5, 6 之间的中误差差别很小,算法 4, 5 与 5, 6 在各样区中误差差别绝对值分别为: 0.019 5, 0.000 8, 0.005 0, 0.004 8, 0.003 0, 0.005 3。综合分析可知,算法 4 偏离平均值较大,易出现极端坡度,不是合适的算法;而算法 5, 6 考虑不同距离上的点对中心单元的影响,分别取

4个直接邻接单元的权重为2而4个角落单元的权重为1,考虑的邻接单元更多更细致,提高了坡度的精度。因此算法5,6在3个地貌类型上都是较合适的所得坡度精度较高。

表3 6种算法在3个样区内的精度比较

算法编号	中误差 (样区1)	中误差 (样区2)	中误差 (样区3)
1	7.288 854	8.227 759	10.016 16
2	0.882 815	0.697 314	0.816 642
3	0.808 103	0.654 154	0.745 378
4	0.554 142	0.605 123	0.661 580
5	0.539 409	0.605 926	0.666 890
6	0.534 643	0.602 946	0.661 580

各算法在3个样区的中误差平均值分别为1.76, 1.90, 2.26,从样区1到样区3逐渐变大,而3个样区的坡度平均值是逐渐减小的,说明坡度比较小的地方所得坡度中误差比较大,这与坡度中误差主要分布在地势比较平坦的地区是相符的<sup>[3]</sup>,从表3横向比较可以看出,算法5,6所得坡度中误差也随坡度平均值的减小而增大,进一步验证了算法5,6能正确反映误差分布规律,是3个地貌上较合适的算法。

本研究还对每种算法提取坡度的最大值、最小值、平均值以及标准差分别进行了排序。分析发现,算法5,6均没出现提取坡度信息的极端情况。

## 4 结论

6种算法均能正确反映坡度变化的大体趋势,不会改变地形变化的内在规律,因此在地形特征的可视化和地形分类方面可选取6种算法中的任一种,而在需要准确的坡度信息或进行以数值计算为主的地质学分析时,在3种地貌类型上,算法5,6是较合适的,并且从分析中可以发现在不同的地貌类型上使用8个邻接单元的算法精度总高于使用2个或4个邻接单元的算法。但由于本研究选取了3种地貌类型,地貌类型较少且均是较复杂地形未对地势较平坦的平原

地区研究,在以后的研究中可以研究更多的地貌类型,以找出在不同地貌类型上坡度算法选取的更加普遍的规律。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 汤国安,陈正江,赵牡丹,等. ArcView 地理信息系统空间分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 167—168.
- [2] 周启鸣,刘学军. 数字地形分析[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 88—98.
- [3] 李天文,刘学军,汤国安. 地形复杂度对坡度坡向的影响[J]. 山地学报, 2004, 22(3): 272—277.
- [4] Carter J. The effect of data precision on the calculation of slope and aspect using gridded DEMs[J]. Cartographica, 1992, 29(1): 22—34.
- [5] Gao J. Resolution and accuracy of terrain representation by grid DEMs at a microscale[J]. Geographical Information Science, 1997, 11(2): 199—212.
- [6] Skidmore A K. A Comparison of Techniques for Calculation Gradient and Aspect from a Gridded Digital Elevation Model[J]. International Journal of Geographical Information Systems, 1989(3): 323—334.
- [7] Hodgson M E. Comparison of Angles from Surface Slope/Aspect Algorithms[J]. Cartography and Geographic Information Systems, 1998, 25: 173—185.
- [8] 汤国安,杨勤科,张勇. 不同比例尺DEM提取地面坡度的精度研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(1): 53—56.
- [9] 刘学军,龚健雅,周启鸣,等. 基于DEM坡度坡向算法精度的分析研究[J]. 测绘学报, 2004, 33(3): 258—263.
- [10] 赵牡丹,陈正江,晋锐. DEM提取地面平均坡度误差的量化模拟[J]. 水土保持通报, 2002, 22(3): 55—57.
- [11] 陈楠,王钦敏,汤国安,等. 6种坡度提取算法的应用范围分析: 以在黄土丘陵沟壑区的研究为例[J]. 测绘信息与工程, 2006, 31(4): 20—22.
- [12] 陈楠,王钦敏,汤国安,等. 自DEM由不同算法提取坡度的对比分析[J]. 测绘工程, 2006, 15(1): 6—9.
- [13] 李志林,朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 2000: 140—145.
- [14] 刘学军,王叶飞,曹志东,等. 基于DEM坡度坡向误差空间分析特征研究[J]. 测绘通报, 2004, 22(3): 272—277.