

# 直方图匹配算法进行坡度变换的精度评价

胡云华<sup>1,2</sup>, 贺秀斌<sup>1</sup>, 毕景芝<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

**摘 要:** 为了减小 DEM 分辨率下降所引起地形坡度变缓效应, 对直方图匹配算法在空间域上的精度进行验证, 以山东丘陵北岩子口沟小流域为研究区, 将研究区低分辨率坡度数据和高分辨率坡度数据进行直方图匹配, 并对匹配后数据多项频率域和空间域指标进行评价。结果表明: 直方图匹配算法可以很好地还原整幅图像坡度的最大值和平均值, 地形粗糙程度得到了很好地恢复, 但处理后的坡度相对于基准数据的中误差和误差标准差分别为 23.5° 和 49.85°, 与未处理的数据相差无几, 说明算法只对地形统计特征的改善有效, 对于实际地形的还原能力还有待改进。

**关键词:** 坡度变换; 精度评价; 直方图匹配; DEM

中图分类号: P282

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2013)06-0097-05

## Assessment on the Accuracy of the Histogram Matching Algorithm for Slope Correction

HU Yun-hua<sup>1,2</sup>, HE Xiu-bin<sup>1</sup>, BI Jing-zhi<sup>3</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards & Environment, Chinese Academy of

Sciences, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100049, China; 3. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to reduce the effect of slope reduction which was caused by the reduction of DEM resolution and to validate the accuracy of the histogram matching in spatial domain, a small watershed called Beiyanzikou was selected in the hilly areas of Shandong. The histogram matching method was used to match the two images and evaluate the accuracy in both spatial and frequency domains in this area. The results showed that the algorithm can significantly recover the maximum and average value of the slope, but the mean square error and relative standard error were 23.5° and 49.85°, respectively; It is almost the same as the unchanged image, so the method just changed the statistical feature of the image. The topography recovery ability of the method needed to be further improved.

**Key words:** correction slope; accuracy assessment; histogram matching; DEM

由于在地形分析中的重要作用, DEM 数据和基于 DEM 的坡度、坡长、坡向等地形因子的提取算法及其精度问题多年以来一直是研究的热点<sup>[1-3]</sup>。汤国安和刘学军<sup>[4-7]</sup>等的研究表明, DEM 网格大小是影响坡度提取结果的重要原因, 研究发现, 随着 DEM 分辨率的下降, 地形具有坡度衰减、坡长扩张的效应<sup>[8-10]</sup>, 然而在实际应用中, 由于条件和经费的限制, 在进行大尺度研究区地形因子提取时, 很难获得高分辨率的 DEM 数据, 因此采用合理的方法进行校正是一种有效提高数据精度的方法。杨勤科等<sup>[11]</sup>以黄土

高原为研究区, 提出了一种用数字图像处理中的直方图匹配算法进行坡度变换的方法, 经验证, 该方法能很好地拟合数据的直方图, 从而提高数据的质量, 并推广到其它地区。但该方法存在的一个问题是只从图像统计的角度对坡度数据进行校正, 在校正过程中丢失了像元的空间位置信息, 在对像元值进行处理时, 形成一刀切的状况, 处理结果在空间域上的精度还有待验证, 因此在使用该算法前, 最好能进行空间域和频率域的双重验证。但很多人在应用时没有注意到这个问题, 郭伟玲等<sup>[12]</sup>用该算法对黄土丘陵沟

壑区进行坡长变换,结果表明,该算法可以很好地修正因 DEM 分辨率下降引起的坡长扩张效应,而且图像空间格局基本保持不变,但根据其统计的图像标准差,校正后的坡长误差较大。刘前进<sup>[13]</sup>、史云飞<sup>[14]</sup>、史彩宁<sup>[15]</sup>、泮雪芹<sup>[16]</sup>等都使用了该算法对坡度数据进行处理,但都没有考虑精度的问题。

本文以山东丘陵区北岩子口沟小流域作为研究区,使用直方图匹配算法将研究区低分辨率 DEM 获得的坡度频率累积直方图匹配到高分辨率的坡度频率累积直方图上,并对匹配后的图像分别从统计特征和空间特征方面进行精度评价,为算法的应用和改进提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

山东丘陵分隔为鲁东和鲁中丘陵两部,研究区位于山东省鲁东丘陵中部北岩子口沟小流域,地处栖霞市西北郊(北纬 37°19′59″—37°22′30″,东经 120°45′00″—120°48′47″),平均海拔 175 m,流域面积 25.87 km<sup>2</sup>,该区域为低山丘陵地貌,大小侵蚀沟发育,沟壑切割深度 1~20 m,侵蚀沟呈明显的“U”型或“V”型,沟两侧大都有人工修筑的梯田。土地利用类型为林地、草地、梯田、果园等。该地区为中纬度西风带季风气候,年平均气温 12.6℃,四季比较分明,春季多风少雨,空气比较干燥;夏季气温较高并多雨,空气比较湿热;秋季较为凉爽少风,雨量较适中;冬季较寒冷降雪量适中,多为偏北风。由于地表土质较为疏松,夏季多暴雨,导致区内季节性土壤侵蚀和水土流失严重,沟蚀地貌广泛发育。

### 1.2 数据来源和预处理

研究数据来源于国土局 1:1 万 DLG 数字化地形图数据,包含等高线、高程点等基本信息。在 ArcGIS 9.3 中利用研究区的等高线数据,建立 TIN 数字高程模型,然后用 TIN 插值分别获得地面分辨率为 5 m 和 20 m 的 DEM。利用数字化地形图中的 1 223 个已知高程点对插值生成的 DEM 进行验证,插值数据的中误差分别为 2.85 m 和 3.82 m,均低于国家山地标准 5 m 中误差要求,说明插值结果是可信的。已有研究表明,1:1 万地形图适合制作空间分辨率为 5 m 的 DEM 图<sup>[17]</sup>,本研究过程中,以 5 m 的 DEM 所获得的坡度值作为标准数据,20 m 的 DEM 获得的坡度值作为校正数据。为了更好地对数据进行对比分析,利用 ArcGIS 9.3 的重采样工具将 5 m 和 20 m 的两幅 DEM 图像都采样到 10 m,分别以 SLP 5 m

和 SLP 20 m 来表示,而校正后的坡度图以 RSLP 20 m 表示。

### 1.3 坡度的计算

使用 ArcGIS 9.3 的 slope 工具对 DEM 求取坡度, ArcGIS 9.3 采用的是三阶反权距离平方差分法提取  $x$  和  $y$  方向上的变化率  $f_x$  和  $f_y$ ,其坡度 SLP 表示为:

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

$$f_x = [z_7 - z_1 + 2(z_8 - z_2) + z_9 - z_3] / (8g) \quad (2)$$

$$f_y = [z_3 - z_1 + 2(z_6 - z_4) + z_9 - z_7] / (8g) \quad (3)$$

式中:SLP——像元的坡度; $f_x$  和  $f_y$ ——在  $x$  和  $y$  方向上的变化率。

### 1.4 图像频率统计

对两幅坡度图像的像元值进行统计,分别得到图像的频率直方图和累积频率直方图。从坡度频率图(图 1)和累积频率图(图 2)上可以看出,两种不同分辨率的 DEM 获得的坡度数据差别很大,从统计值来看,5 m 的 DEM 所提取的坡度最大值为 54.3°,而 20 m 的 DEM 提取的坡度的最大值为 37.35°,DEM 分辨率降低带来的坡度变缓效应十分明显。

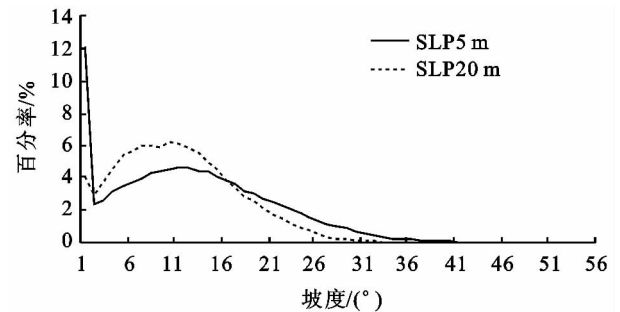


图1 坡度频率直方图

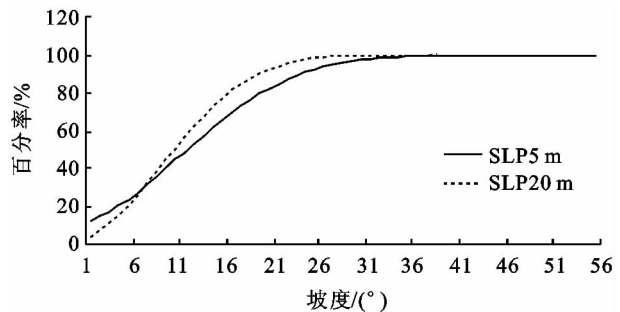


图2 坡度累积频率直方图

## 2 直方图匹配

### 2.1 匹配的原理

如图3所示,实线条代表精度较高的数据的累积频率直方图,虚线条代表精度较低的数据的累积直方图,在  $x$  轴上读取一点  $X_1$  其对应的累积频率值是  $Y_1$ ,而此时在精度较高的累积直方图曲线上,和  $Y_1$  相等的  $Y_2$  值对应的坡度值为  $X_2$ ,而直方图匹配的原

理就是由  $X_1 \rightarrow Y_1 \rightarrow Y_2 \rightarrow X_2$  从而推出  $X_1$  和  $X_2$  之间的关系,将待校正的坡度值  $X_1$  带入函数关系中,求解出其校正值  $X_2$ 。

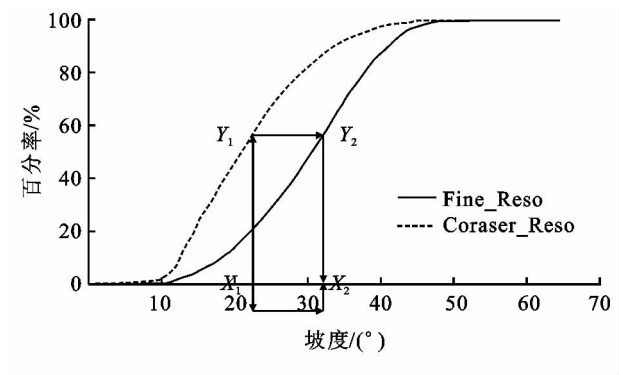


图 3 直方图匹配原理<sup>[11]</sup>

2.2 两组坡度函数关系的求解

根据直方图匹配原理,在 Matlab 软件中,利用分段线性插值函数 interp1 对两条曲线进行分别拟合,即相当于建立了两条曲线的函数关系式  $Y_1$  和  $Y_2$ ,再利用等式  $Y_1(X_1)=Y_2(X_2)$  得到关于  $X_1$  和  $X_2$  的一组对应关系(图 4)。

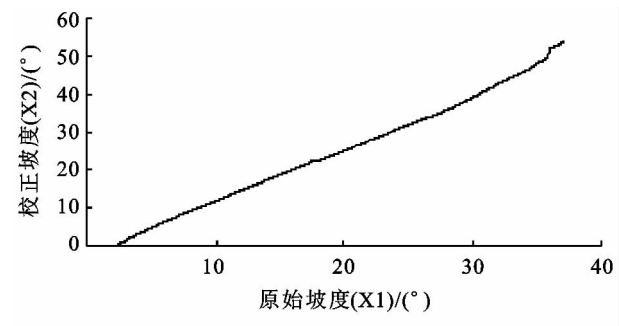


图 4 原始坡度和校正值的对应关系

从得到的累积频率直方图(图 2)曲线可以看出,两组数据的累积曲线有一个明显的交点,这意味着对于精度较低的数据而言,不是做单纯的锐化或者平滑处理,而是在坡度较小时,要做平滑处理,在坡度较大时要做锐化处理。从  $X_1$  和  $X_2$  的对应曲线(图 4)上,也能看出这种特征,不同的坡度范围对应着不同的曲线斜率,根据曲线特征可以大致分为四段,每一段都接近于直线,因此可以用一阶线性方程对其进行拟合,拟合公式及误差见表 1。

表 1 变换数据的分段线性拟合公式及误差

取值范围	函数关系式	$R^2$	误差
$x \leq 2.29$	$y = 0$	1	0
$2.29 < x \leq 5.5$	$y = 1.715x - 3.822$	0.998	0.068
$5.5 < x \leq 30$	$y = 1.347x - 1.675$	1	0.110
$x > 30$	$y = 2.004x - 21.483$	0.978	0.609

在 ArcGIS Workstation 中利用 AML 语言实现上述分段函数变换(主要用了 con 条件命令,处理代码见附件),处理完成后分别对标准坡度图 SLP 5 m,

待校正坡度图 SLP 20 m,和校正后的坡度图 RSLP 20 m 进行直方图统计,结果如图 5 和图 6 所示。

从图 5—6 可以看出,经过直方图匹配算法校正后,RSLP 20 m 的频率直方图和累积频率直方图 and 标准图像直方图都非常接近,达到了校正的目的。

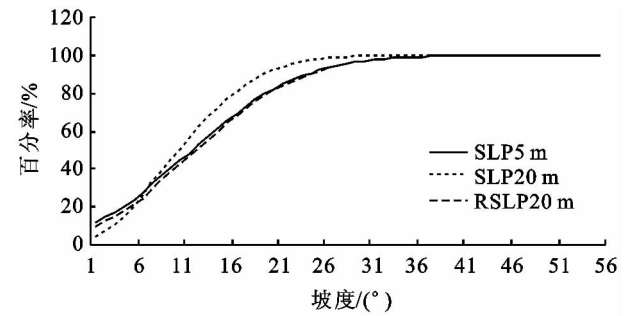


图 5 坡度累积频率直方图对比

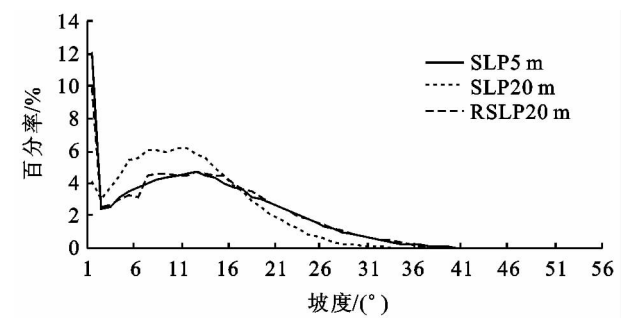


图 6 坡度频率直方图对比

3 算法精度评价

3.1 频率域精度评价

算法在频率域的精度评价实际上是比较图像的各统计参数同标准数据的各统计参数的接近程度。利用 ArcGIS 9.3 的 Band collection statistics 工具,可求得各坡度数据的最小值、最大值、平均值、标准差 4 个参数。图像的标准差(standard deviation; STD)是一幅图像数据离散程度的一种度量,图像标准差越大,像元数值和整幅图像的平均值之间差异越大,DEM 或者坡度图的标准差值实际代表了地形的粗糙程度,图像标准差越小,图像离散程度越小,地形变化越平缓;图像标准差越大,图像离散程度越大,地形起伏变化越明显,对三幅坡度图像进行统计分析,结果见表 2。

表 2 统计分析结果 (°)

名称	最小值	最大值	平均值	STD
SLP 5 m	0	54.30	11.96	8.45
SLP 20 m	0	37.35	10.47	6.17
RSLP 20 m	0	53.37	12.35	8.39

从表 2 可以看出,5 m 的 DEM 所提取的坡度值精度明显高于 20 m 的 DEM,20 m 的 DEM 对地形进行了平滑,使坡度的最大值从 54.30°降到了

表 3 校正和未校正的坡度数据误差指标分析结果

名称	协方差	相关系数	ME/(°)	RMSE/(°)	STD/(°)
SLP 20 m	42.57	0.83	1.50	22.50	48.16
RSLP 20 m	57.88	0.83	-0.39	23.50	49.85

从图像协方差和相关系数来看,虽然经过校正后,坡度的协方差有所提高,但相关系数和原来的未校正的坡度图大体相当,说明针对空间上某一具体位置点,校正后的坡度值相对于标准数据的精度并没有得到很好地提高。经过校正后,坡度的平均误差接近于 0,说明校正后的坡度数据从整体上和标准数据非常接近,但是从中误差和误差标准差来看,校正数据的中误差甚至有所加大,一般认为,两幅图像的中误差是判断两幅图像接近程度的主要指标,经过校正后中误差没有有效地降低,说明算法在具体空间点上的校正精度还存在不足。

4 结论和建议

综上所述,利用不同空间分辨率的 DEM 进行地面坡度提取时,DEM 网格的大小会明显影响地表的起伏程度,随着 DEM 分辨率的减小,所获得的地形坡度逐渐减小,地形变得平缓。利用数字图像处理中的直方图匹配算法,可以有效地对平缓后的坡度数据进行校正,恢复原地表粗糙程度,建立的校正函数关系甚至可以推广到其它地区。但是应该注意的是,该算法是建立在数据统计特征基础上的,校正过程抛开了数据的空间位置信息,虽然从整体上恢复了地形的起伏程度,但校正后数据的中误差和校正前相当,说明算法在具体空间位置上的校正结果还不理想。在实际应用过程中该算法可以用于地形整体粗糙程度的还原,获取研究区的地形坡度统计信息,用于经验性的土壤侵蚀模型或水文模型的运算。但不建议将算法用于分布式土壤侵蚀模型的建立,因为土壤侵蚀过程不仅取决于地形还取决于地表植被覆盖、土壤质地、降雨和水土保持措施等,分布式土壤侵蚀模型是在一个空间位置点同时考虑以上诸多因素进行运算的,该算法处理的结果没有很好地空间还原精度,将处理后的数据带入模型所得到的结果不一定可靠。提高算法在每一个像元点校正的精度,是算法需要进一步改进的地方。

附:对 SLP 20 m 数据进行坡度校正的 AML 代码如下:

```
Grid:S1=con(S<=2.29,0,S)
Grid:S2=con(S>2.29&.S<=5.5,1.715*S
```

—3.822,S1)  
Grid;S3=con( $S>5.5\&S<30,1.347 * S - 1.675,S2$ )  
Grid;S4=con( $S\geq 30,2.004 * S - 21.483,S3$ )  
其中 S 是待校正的 SLP 20 m,S4 是校正后的 RSLP 20 m。

**致谢:**感谢鲁东大学何福红副教授为本文提供的 1:1 万地形图数据。

参考文献:

[1] Carter J. The effect of data precision on the calculation of slope and aspect using gridded DEMs[J]. Cartographica,1992,29(1):22-34.  
[2] Thompson J A, Bell J C, Butler C A. Digital elevation model resolution: Effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling[J]. Geoderma, 2001,100(1):67-89.  
[3] 刘学军,龚健雅,周启鸣,等. DEM 结构特征对坡度坡向的影响分析[J]. 地理与地理信息科学,2004,20(6):1-5.  
[4] 汤国安,龚健雅,陈正江,等. 数字高程模型地形描述精度量化的模拟研究[J]. 测绘学报,2001,3(4):361-365.  
[5] 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,2006:188-189.  
[6] 贾敦新,汤国安,王春. DEM 数据误差与地形描述误差对坡度精度的影响[J]. 地球信息科学学报,2009,11(1):43-49.  
[7] 王峰,王春梅. 地形因子与 DEM 分辨率关系的初步研究:以蒙阴县为例[J]. 水土保持研究,2009,16(4):225-229.  
[8] Gao J. Resolution and Accuracy of Terrain Representation by Grid DEMs at a Micro-scale[J]. International Journal of Geographical Information Science, 1997, 11

(2):199-221.  
[9] David M W, McCabe G J. Differences in Topographic Characteristics Computed from 100- and 1000-m Resolution Digital Elevation Model Data[J]. Hydrological Processes,2000,14(6):987-1002.  
[10] 牛亮,杨勤科. DEM 尺度变换中直方图相似度计算与应用[J]. 水土保持研究,2010,17(3):120-125.  
[11] Yang Q K, Jupp D, Li R, et al. Re-scaling lower resolution slope by histogram matching[C]//Zhou Q M, Lees B G, Tang G A. Advances in Digital Terrain Analysis. Berlin:Springer,2008:193-210.  
[12] 郭伟玲,杨勤科,程琳,等. 区域土壤侵蚀定量评价中的坡长因子尺度变换方法[J]. 中国水土保持科学,2010,8(4):73-78.  
[13] 刘前进,于兴修. 北方土石山区土壤侵蚀强度垂直景观格局:以沂蒙山区为例[J]. 地理研究,2010,29(8):1471-1483.  
[14] 史云飞,张玲玲. 鲁中南山地丘陵区土壤侵蚀强度景观格局的动态变化[J]. 生态学杂志,2012,31(8):2059-2065.  
[15] 史彩宁,常庆瑞,王春梅. 基于 GIS 的延安市土壤侵蚀强度等级评价[J]. 水土保持研究,2010,17(3):28-31.  
[16] 泮雪芹,刘占仁,孟晓云,等. 云蒙湖流域不同土地利用类型的土壤侵蚀特征分析[J]. 水土保持研究,2012,8(4):6-9.  
[17] 杨勤科,李锐,梁伟. 区域水土流失地形因子的地图学分析[J]. 水土保持研究,2006,13(1):56-58.  
[18] Snedecor G W, Cochran W G . Statistical Methods. 6th ed[M]. Ames, Iowa: The Iowa State University Press,1968.  
[19] 刘飞,范建容,郭芬芬,等. 藏北高原区 DEM 高程与坡度值提取的误差分析[J]. 水土保持通报,2011,31(6):148-151.

(上接第 87 页)

[6] 丁访军,王兵. 赤水河下游不同林地类型土壤物理及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报,2009,23(3):179-183.  
[7] 李海防,卫伟,陈利顶,等. 黄土高原林草地覆盖土壤水量平衡研究进展[J]. 水土保持研究,2011,18(4):287-291.  
[8] 汪永英,段文标. 小兴安岭南坡 3 种林型林地水源涵养功能评价[J]. 中国水土保持科学,2011,9(5):31-36.  
[9] 刘学全,唐万鹏,崔鸿侠,等. 丹江口库区主要植被类型水源涵养功能综合评价[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2009,33(1):59-63.  
[10] 莫非,李叙勇,贺淑霞,等. 东灵山林区不同森林植被水源涵养功能评价[J]. 生态学报,2011,31(17):5009-5016.  
[11] 高岗,秦富仓,姚云峰,等. 东北农牧交错带小流域不同林草植被类型水源涵养功能综合评价[J]. 干旱区环境

与资源,2009,23(6):132-135.  
[12] 聂忆黄,龚斌,衣学文,等. 青藏高原水源涵养能力评估[J]. 水土保持研究,2009,16(5):210-213.  
[13] 冯少辉,李靖,驻振峰,等. 云南省滇中地区水资源脆弱性评价[J]. 水资源保护,2010,26(1):13-16.  
[14] 马慧群,刘凌,陈涛,等. 模糊差优选模型在水环境安全评价中的作用[J]. 水电能源科学,2008,26(3):32-34.  
[15] 陈鸿起,汪妮,申毅荣,等. 基于欧式贴近度的模糊物元模型在水安全评价中的应用[J]. 西安理工大学学报,2007,23(1):37-42.  
[16] 常龙芳,史正涛,曾建军,等. 滇中城市水源地森林枯落物及土壤水源特性[J]. 城市环境与城市生态,2013,26(1):15-19.