

## DEM 内插算法对坡度坡向的影响<sup>\*</sup>

陈吉龙<sup>1</sup>, 武 伟<sup>2</sup>, 刘洪斌<sup>1</sup>

(1. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400716; 2. 西南大学 计算机与信息科学学院, 重庆 400716)

**摘 要:**虽然 DEM 的应用越来越广泛,但是在实际研究运用中获取 DEM 的方式主要是利用各种矢量高程信息通过插值而来,不同的插值算法必然会影响 DEM 分析的结果;以南方丘陵地区为研究区域,利用样区的 1:10 000 的矢量地形图数据源,通过对不同算法生成不同分辨率的 DEM 坡度、坡向的对比研究发现:在坡度小于 30°时,不同的算法对坡度具有显著的影响,而大于 30°时分辨率和算法均不会对坡度产生显著影响;研究表明:在具有大量平坦区域的地区,尽管 ANUDEM 算法生成的 DEM 总体上的精度最高,但是不会产生平坦区域,所以并不适合于这类地区的地形分析。

**关键词:**DEM; 坡度; 坡向; 地形分析

**中图分类号:**S157; TP79

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2008)06-0014-04

## Effect of DEM Interpolation on the Slope and Aspect

CHEN Ji-long<sup>1</sup>, WU Wei<sup>2</sup>, LIU Hong-bin<sup>1</sup>

(1. College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. College of Computer and Information Science, Southwest University, Chongqing 400716, China)

**Abstract:** In many cases of the research and application, digital elevation data may be the only source for DEM generation with algorithms, which are available or affordable. It is known that the analytic result from the DEM can vary in quality depending on their algorithms. Taking hilly region in southern China as research region, using the digital contour with the scale of 1:10 000 as the source, this paper compared the slope, aspect from the DEM generated with five algorithms, the results showed that there were significant effect on the slope among the algorithms when the slope < 30°, but there were no significant effect on the slope among the algorithms and resolution when the slope > 30°. Furthermore, the result also showed that DEM interpolated with ANUDEM is the most precise, however, there was no flat area in the result from the terrain analysis in the region with extensive flat area, so it can't be suitable for performing terrain in such region.

**Key words:** DEM; slope degree; slope direction; terrain analysis

### 1 引言

自从 DEM 理论形成以来,不同的学者就对 DEM 做过大量的研究,研究领域侧重于利用 DEM 来进行地形分析、水文分析、DEM 精度评价、地形描述误差、数学模拟方法以及探索新的 DEM 算法<sup>[1]</sup>;其中地形分析是 DEM 研究的重要内容,是地质地貌研究的重要手段;虽然地形分析中所采用的 DEM 建立方法多种多样,但是当前乃至今后一段时期内 DEM 的生产依然是利用各种矢量高程信息通过构建 TIN 建立 DEM;然而该方法的缺点是仅利用等高线生成 DEM 不能很好地反映河流和流域边界等重要地貌特征<sup>[2]</sup>;Hutchinson 于 20 世纪 80 年代提出的 ANUDEM 插值算法<sup>[3]</sup>,大量的研究也表明 ANUDEM 算法生成的 DEM 能更加精确地描述地貌特征<sup>[4]</sup>,其质量较现有基于 TIN 方法建立的 DEM 有明显提高<sup>[5]</sup>,因而在全球范围内得到广泛应

用<sup>[6-7]</sup>,然而国内对于 ANUDEM 算法的应用很少见;在地形分析中,虽然众多学者对相同数据源生成的 DEM 的不同分辨率对地形分析结果的影响进行了研究<sup>[7-9]</sup>,然而其中很多的分辨率太低,忽略了地形描述精度,使分析结果受到严重的影响;本文对不同算法生成的不同分辨率的 DEM 提取的坡度、坡向进行对比分析,以期对地形分析中 DEM 的建立和分辨率的选择及相关的研究提供参考。

### 2 材料与方法

#### 2.1 研究区概况

研究区地处长江上游,重庆市西南边缘,位于重庆江津市,介于东经 106°10'45" - 106°23'42" 和北纬 29°22'50" - 29°31'17",面积 79.36 km<sup>2</sup>;地势中高西低,中部低山呈东北走向,东西以丘陵为主,最高海拔 765.58 m,最低海拔 255.34 m,相对高差达 510.24 m。

<sup>\*</sup> 收稿日期:2008-04-18

基金项目:重庆市科委重点攻关项目(2006AB1015);重庆市教委科技资助项目(0182)

作者简介:陈吉龙(1983-),男,重庆巫山人,硕士研究生,从事 3S 应用研究。E-mail: cjl47168@163.com

通信作者:刘洪斌(1966-),男,重庆梁平人,研究员,从事 3S 应用研究。E-mail: lqb2000@163.com



图1 研究区域地貌及样点分布

## 2.2 DEM算法

虽然DEM建立的方法多种多样,然而,迄今为止最为成熟和可行的方法仍然是将现有地形图数字化,通过插值生成DEM;目前利用等高线生成DEM的方法有多种,考虑到内插算法的普遍性和实用性,本文选择反距离加权内插、样条函数内插、自然邻点内插、TIN内插、ANUDEM算法来对比分析。

TIN内插这种方法首先由等高线生成TIN,再TIN内插生成DEM,这种方法在速度和效率方面都是最优的,可以充分考虑等高线所表达的地形特征,而且可以适应任意复杂的图形数据,还能顾及地形特征,运行速度也很快,建模效率高<sup>[1]</sup>。

反距离加权内插(IDW)是以离散点到内插格网点距离为变量的距离加权函数,一般选取距平方的倒数作为权重,从以格网点为中心的多个方向选择样本点,距离内插点越近的样本点,对内插格网点内插值的影响越大<sup>[12]</sup>。计算公式如式(1)。

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n (d_i)^{-p} z_i}{\sum_{i=1}^n (d_i)^{-p}} \quad (1)$$

式中: $z$ ——插值点的内插值; $n$ ——实测样本点数; $d_i$ —— $i$ 点与插值点之间的距离; $z_i$ ——第 $i$ 个已知点的数值; $p$ ——距离的幂。

样条函数内插(SPL)是用一条通过一组已知点的平滑曲线,并依据这条曲线来估算范围内每个插值点值,样条函数插值表面通过所有采样点,并且插值点的估计值会超过样本点的取值范围。

自然邻点内插(NN)是一种基于Voronoi图的内插方法,它首先构造采样点的Voronoi图,当在数据集中插入一个新的数据点时,修改与原始数据点对应的Voronoi图,自然形成插值点的邻域点集。

ANUDEM算法是在Hutchinson教授长期研究成果基础上开发的,经过20多年的发展,其算法不断得到完善,ANUDEM算法是将地形强化算法后自动计算河流山脊线的算法与有限微分内插算法相结合,它能够自动去除伪下陷点而改善DEM的质量,使建立的DEM更符合真实地形<sup>[3]</sup>。

## 2.3 地形因子的提取

数字地形分析是地质地貌研究的重要手段,主要包括基本地形因子分析(包括坡度、坡向等)和复杂地形分析(可视性分析、地形特征提取和流域特征分析等)两部分,而基本地

形因子又是复杂的地形分析的基础;坡度和坡向作为基本地形分析两个最重要的地形因子,是描述地形特征信息的两个重要指标,是其他地学分析的基础。

坡度( $S$ )、坡向( $A$ )是地球上某点在地表曲面上沿着东西、南北方向上高程变化率的函数;自从DEM理论形成以来,人们就对计算坡度、坡向的方法进行了大量的研究,迄今为止,已经在DEM上提出和发展了多种坡度、坡向计算数学模型<sup>[11]</sup>;然而在实际应用中,人们通常采用的仍然是利用各种GIS软件自动提取坡度和坡向,其原理是利用DEM中心格网8个邻域格网( $3 \times 3$ 窗口)的高程来计算坡度和坡向,每个中心格网为一个高程点,则中心格网的坡度 $S$ ,坡向 $A$ 的计算公式如(2),(3)。

$$S = \arctan \sqrt{S_x^2 + S_y^2} \quad (2)$$

$$A = 270^\circ + \arctan(S_y/S_x) - 90^\circ \times (S_x/|S_x|) \quad (3)$$

式中: $S_x$ ——南北方向高程变化率; $S_y$ ——东西方向高程变化率。

在ARCGIS中,坡度和坡向的计算通常使用 $3 \times 3$ 窗口,窗口在DEM高程矩阵中连续移动后,完成整幅图的坡度、坡向的计算。

利用研究区域的矢量地形图,采用不同的算法生成不同分辨率的DEM;根据实际的地形选取具有代表性的298个高程点(图1),利用GPS定位仪记录其位置及高程值;按照国家测绘局1:1万数字高程模型生产技术规定,利用检查点来检查DEM的精度,通过对生成的DEM在实际布点处进行检查,将这些点处的内插高程和实际高程逐一比较得到各个点的误差,然后算出中误差(RMSE)。其计算如式(4)。

$$DEM = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (R_k - Z_k)^2 \quad (4)$$

式中: $n$ ——检查点的个数; $R_k$ ——内插点的高程值; $Z_k$ ——检查点的高程。

通过计算得到不同分辨率下的DEM的中误差(表1)

表1 不同算法的不同分辨率的中误差

不同 算法	分辨率/m						
	15	3	5	7	9	11	13
IDW	2.92	2.73	2.80	3.05	3.53	4.76	7.15
NN	2.13	2.15	2.18	2.34	2.68	3.22	6.14
SPL	2.40	2.50	2.52	2.76	3.20	4.13	7.53
TIN	2.05	2.14	2.20	2.31	2.45	2.74	4.68
ANU	1.58	1.66	1.83	2.05	2.27	2.52	3.09

根据国家测绘局1:1万数字高程模型生产技术规定对DEM生产精度的相关要求,按照丘陵山地地区三级的标准,要求中误差小于5m;而IDW,NN,SPL在分辨率为15m时中误差都超过了5m,因此我们选择分辨率为3~13m的DEM来对比分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同算法对坡度的影响

为了更直观的数据分析,将坡度数据进行重分类,将DEM所提取的坡度按照每3°分为一个等级,大于51°的合并为一级,总共18级( $0 \sim 3^\circ, 3 \sim 6^\circ, \dots, 48 \sim 51^\circ, > 51^\circ$ )进行面

积统计分析,并用每个级别的面积占研究区域总面积的比例来分析不同算法对坡度的影响(图 2)。

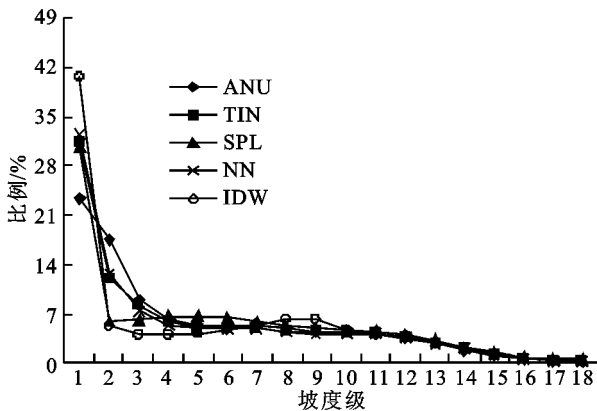


图 2 不同算法的不同坡度级的面积比例

坡度分级结果显示:不同算法下的 DEM 所提取的坡度差异主要分布在第 1~10 级之间的区域(0~30°),其中 1,2(0~6°)级的变化最为明显,由 IDW 生成的 DEM 提取的坡度在第 1 级(0~3°)所占的面积最大,达到了 40.53%,ANUDEM 最小,为 23.50%,表明 IDW 算法对地形具有很强的平坦化作用,而 ANUDEM 算法最弱;而从后面的坡向分析中还发现 ANUDEM 所生成的 DEM 提取的坡向中并没有平坦(0°)的区域,这就很好地解决了水文分析中平坦区域水流的流向问题,而被广泛应用到水文分析中。而在坡度为 2 级(3~6°)时却恰恰相反,由 IDW 生成的 DEM 所提取的坡度所占的面积最小,为 5.28%,ANUDEM 最大,达到了 17.45%。在坡度为 3~10 级之间(6~30°),SPL, IDW, NN 变化趋势比较一致,其中 ANUDEM 稍大, NN 稍小;而 IDW 和 SPL 变化比较大并呈现出截然相反的趋势,在 0~22° 之间 SPL 要远大于 IDW,而在 22~30° 之间 IDW 要远大于 SPL。而在坡度为 10~18 级之间(>30°)各种算法所生成的 DEM 所提取的坡度变化趋势比较一致并没有显著的差别,表明在 >30° 的区域不同的 DEM 算法对坡度的影响并不显著。

### 3.2 不同算法对坡向的影响

坡向对农业耕作具有很强的指导意义,本文将不同算法生成的 DEM 提取的坡向分为 9 个级别,即平坦区、正北、东北、正东、东南、正南、西南、正西和西北 8 个朝向;其中坡向值为 -1 时代表平坦区,正北方向在统计计算中是 0~22.5° 和 337.5~360° 两个坡向面积的总和,其他 7 个朝向的坡向分级依次是:22.5~67.5°,67.5~112.5°,112.5~157.5°,157.5~202.5°,202.5~247.5°,247.5~292.5°,292.5~337.5°;为了便于直观分析,我们将坡向进行了重分类,依次用 1~9 的 9 个整数来代表不同的坡向,重分类的结果见图 3。

坡向重分类的结果显示:不同算法生成的 DEM 提取的坡向在平坦区的面积差异最大;ANUDEM 算法生成的 DEM 提取的坡向并没有平坦的区域,而是将平坦区域的面积转移到其他 8 个坡向上,因此,8 个坡向 ANUDEM 算法生成的 DEM 提取的坡向必然是最大的,而在 8 个坡向上,除了 SPL 生成的 DEM 以外,其他的 4 种算法生成的 DEM 提取的坡向变化趋势具有一致性,几乎呈平行的分布,其中 ANUDEM 最

大, IDW 最小,而在平坦的区域必然呈现相反的分趋势,表明了 IDW 具有很强的平坦化作用,其平坦的区域达到了 30.23%,而 ANUDEM 却没有平坦化的作用。

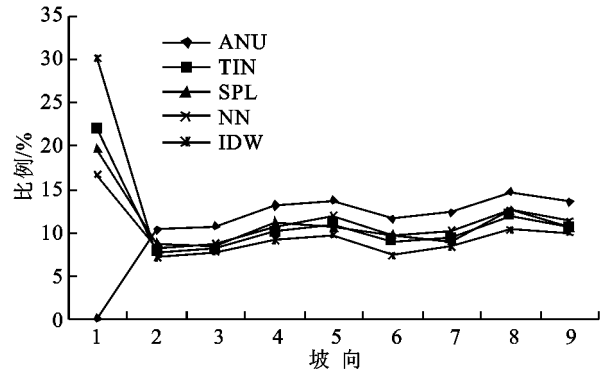


图 3 不同算法的不同坡向的面积比例

### 3.3 分辨率对坡向的影响

同坡向分析一样,用不同分辨率的 DEM 提取的坡向来反映分辨率对坡向的影响(如表 2),研究发现:IDW, NN, TIN 生成的 DEM 分辨率对平坦区域的坡向面积影响最大,而且平坦区的面积随着分辨率的提高而增加,其中 IDW 变化最为显著,其变化最大达到 7.91%,而 NN 变化最小;而且平坦区域面积增加的速度也随着分辨率的提高而加快;其他 8 个朝向的面积将会随着分辨率的提高而降低但是趋势基本保持一致,随着分辨率的降低,地貌的细部特征被简化,平坦区域的面积将会转移到其他 8 个坡向上,其中在东坡面积变化最小,最大变化仅仅为 0.54%;SPL 生成的 DEM 分辨率对东(4)、南(6)、西(8)、北(2)四个坡向几乎没有影响,其最大差异仅为 0.11%,而在其他 4 个坡向上变化要比其他的更为显著;而 ANUDEM 生成的 DEM 的分辨率对坡向没有显著的影响,8 个坡向在最大差异仅仅为 0.1%。

表 2 不同算法的不同分辨率下的坡向的面积比例 %

算法	坡向	分辨率/m					
		13	3	5	7	9	11
IDW	1	33.72	31.96	30.23	28.64	27.17	25.81
	4	9.01	9.09	9.16	9.30	9.46	9.55
NN	1	19.21	17.90	16.70	15.61	14.60	13.68
	4	10.49	10.60	10.72	10.82	10.93	11.04
SPL	3	7.77	8.01	8.31	8.56	8.81	9.05
	4	11.05	11.02	11.05	11.07	11.08	11.08
	6	9.70	9.68	9.67	9.71	9.70	9.65
ANU	7	8.30	8.58	8.91	9.28	9.57	9.89
	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4	13.19	13.18	13.18	13.13	13.07	13.07
TIN	6	11.69	11.64	11.59	11.48	11.48	11.39
	1	25.12	23.51	22.04	20.68	19.44	18.31
	4	9.77	9.94	10.11	10.25	10.39	10.52

注:1 - 平坦区,2 - 正北,3 - 东北,4 - 正东,5 - 东南,6 - 正南,7 - 西南,8 - 正西,9 - 西北,部分数据略

### 3.4 分辨率对坡度的影响

同坡度分析一样,用不同分辨率的 DEM 提取的坡度来反映分辨率对坡度的影响(表 3)研究表明:IDW, NN, TIN,

SPL 生成的 DEM 分辨率主要是影响第 1 级坡度(0~3°)区域,其面积将会随着分辨率的增加而增加,而对于 IDW 来说,受分辨率影响最大的区域并不是第 1 级坡度的区域,而是第 3~10(9°~30°)级之间的区域,其中从第 3 级到第 6 级之间,不同坡度的面积随着分辨率的降低而增加,而且随着坡度的增加,不同分辨率下的坡度的面积差异也越来越大,而从 6 到 10 之间呈现出相反的趋势。不同算法生成的 DEM 在坡度比较大的地方均呈现相似的趋势,而且分辨率对坡度并无显著的影响。而 ANUDEM 生成的 DEM 在不同分辨率下的坡度变化均比较小,表明了分辨率对坡度都没有显著的影响;NN、TIN 生成的 DEM 分辨率对坡度的影响主要是第 1~3(3°~9°)级之间的区域,而大于 3(9°)时分辨率对坡度不会产生显著的影响,其不同的坡度差异均小于 0.1%。

表 3 不同算法不同分辨率下的坡度的面积比例 %

算法	坡度级	分辨率/ m					
		13	3	5	7	9	11
IDW	1	42.67	41.68	40.53	39.43	38.31	37.23
	3	4.09	4.02	4.06	4.19	4.39	4.66
	5	3.97	4.05	4.30	4.69	5.36	6.46
	6	4.16	4.36	4.80	5.61	6.92	8.56
	7	4.34	4.71	5.50	6.84	7.71	5.59
	10	4.68	5.60	4.75	4.12	4.19	4.36
NN	1	33.36	32.90	32.45	32.05	31.67	31.30
	3	7.14	7.27	7.42	7.55	7.70	7.82
	13	2.81	2.82	2.83	2.83	2.79	2.77
TIN	1	32.57	32.00	31.50	31.04	30.62	30.28
	3	7.74	7.91	8.04	8.20	8.29	8.42
	13	2.74	2.80	2.81	2.82	2.78	2.75
SPL	1	31.73	31.47	30.81	29.99	29.31	28.92
	13	3.03	3.07	3.09	3.10	3.09	3.04
ANU	1	23.26	23.33	23.50	23.67	23.70	23.89
	5	5.18	5.24	5.40	5.53	5.73	5.87
	8	4.75	4.89	4.85	4.94	4.93	4.94
	11	4.29	4.43	4.40	4.43	4.33	4.46

注:1:0~3°,3:7°~9°,5:13°~15°,6:16°~18°,7:19°~21°,8:22°~24°,10:28°~30°,11:31°~33°,13:37°~39°,部分数据略

4 结 论

通过对不同算法生成的 DEM 的坡度、坡向对比研究,发现不同算法下的 DEM 所提取的坡度差异主要分布在第 1~10(0~30°)级之间的区域,其中 1、2(0~6°)级的变化最为显著,而在坡度比较大的地方,不同的算法和分辨率均不会对坡度产生显著的影响;所以在这些区域,在满足精度要求的范围内可以尽可能采用较低的分辨率来进行坡度分析,这样既可以降低 DEM 的大小,又不会对结果产生影响。

不同算法生成的 DEM 提取的坡向在平坦区的面积差异最大,其中,由于 IDW 算法对地形具有很强的平坦化作用,使得平坦区域的面积和第 1 级坡度所占面积最大,而 ANUDEM 算法提取的坡向并没有平坦区域,这样使得第 1

级的坡度面积大量减少;所以在这些具有大量平坦区域的地区,尽管 ANUDEM 算法生成的 DEM 总体上的精度最高,能够在水文中产生良好的结果,但是并不适合于地形分析;虽然 ANUDEM 算法因其良好的地形模拟精度而在全球范围内得到广泛应用,但该方法对国内 DEM 研究者尚比较陌生,今后在应用 ANUDEM 算法建立 DEM 进行地形分析的时候,必须重视其应用的范围。

参考文献:

[1] 汤国安,刘学均.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.

[2] More I D,Grayson R B,Landson A R. Digital Terrain Modeling:a Review of Hydrological, Geomorphological, and Biological Applications [J]. Hydrological Processes 1991,5(1):3-30.

[3] Hutchinson M F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits [J]. Journal of Hydrology,1989,106(3/4):211-232.

[4] Yang Q K, Van Niel T G, Mc Vicar T R. Developing a digital elevation model using ANUDEM for the Coarse Sandy Hilly Catchments of the Loess Plateau, China [R]. Canberra, Australia: CSIRO Land and Water Technical Report, 2005.

[5] 杨勤科, Tim R M, 李领涛. ANUDEM - 专业化数字高程模型插值算法及其特点[J]. 干旱地区农业研究, 2006,24(3):36-42.

[6] Hutchinson M F, Dowling T I. A continental hydrological assessment of a new grid based digital elevation model of Australia [J]. Hydrological Processes, 1991, 5:45-58.

[7] Hutchinson M F, Nix H A, McMahon J P, et al. The development of a topographic and climate database for Africa [C]// NCGIA. Proceedings of the Third International Conference/ Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling. California: Santa Barbara, 1996.

[8] 陈楠, 汤国安, 朱红春. 不同空间分辨率 DEM 提取坡度不确定性研究[J]. 水土保持研究, 2006,23(3):153-157.

[9] 汤国安, 赵牡丹, 李天文. 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.

[10] 刘敏, 汤国安, 王春. DEM 提取坡度信息的不确定性分析[J]. 地球信息科学, 2007,9(2):65-70.

[11] 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.

[12] 韩富江, 刘学军, 潘胜玲. DEM 内插方法与可视性分析结果的相似性研究[J]. 地理与地理信息科学, 2007,23(1):31-36.