

文章编号: 1008 - 2786 - (2020)6 - 935 - 10

DOI:10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000569

## DEM 分辨率对坡度算法选择影响的分析

师 动<sup>1</sup>, 朱奇峰<sup>2</sup>, 杨勤科<sup>1\*</sup>, 龙永清<sup>1</sup>

(1. 西北大学 城市与环境学院, 西安 710127; 2. 陕西省动物研究所, 西安 710032)

**摘 要:** 坡度是重要的地表形态要素, DEM 的分辨率对坡度计算具有十分重要影响。研究 DEM 分辨率对坡度最优算法选择的影响, 对坡度精度评价具有重要意义。本文选取地形复杂的绥德和地形简单的拜泉两个样区, 生成 10 ~ 200 m 一系列分辨率的 DEM, 通过对比坡度计算的误差、坡度的信息熵和坡度衰减, 分析 Horn (H) 算法、Zevenbergen (Z) 算法、Evans-Young (EY) 算法、Sobel (Sb) 算法和 Sharpnack (Sp) 算法这五种坡度算法随 DEM 分辨率变化的表现, 认识理解分辨率对坡度算法选择的影响。结果表明: (1) 根据误差结果, 各种分辨率下 EY 算法均为最优; 根据信息熵和坡度衰减 (平均值、标准差) 结果, 各种分辨率下 H 算法均为最优; (2) DEM 分辨率对算法的影响主要表现在其坡度计算结果的差异程度上。在高分辨率时, 不同算法得到的坡度结果差异不大; 而在低分辨率时坡度结果的差异很大, 宜使用推荐的算法; (3) 随 DEM 分辨率降低, 五种算法得到的坡度均发生衰减, 但衰减程度不同, 其中 H 算法衰减最小。 (4) 在实际坡度计算时, 若重点关注坡度的精度, 则优先考虑选用 EY 算法; 若重点关注低分辨率情形下坡度的衰减, 则优先考虑选用 H 算法。研究结果对不同分辨率下坡度算法选择和坡度精度评价均具有十分重要的意义, 这还为地学模型提供了更精确的坡度数据。

**关键词:** 坡度; 算法; DEM 分辨率; 误差; 坡度衰减

**中图分类号:** P208

**文献标志码:** A

坡度是坡地相对于水平地面的倾斜程度<sup>[1]</sup>, 它是现代地表过程<sup>[2]</sup>、土壤侵蚀和水土保持<sup>[3]</sup>、地质灾害<sup>[4-5]</sup>、遥感<sup>[6]</sup>等研究中的关键因子。目前, 基于 DEM 提取坡度已成为坡度获取的主要方式。一方面, 随着 DEM 分辨率的降低, 坡度衰减对坡度影响较大<sup>[7-9]</sup>。另一方面, 坡度算法不同, 各种算法计算结果有所不同<sup>[10]</sup>。因此, 在坡度最优算法的研究中, DEM 分辨率是必须要考虑的一个因素。

已有的关于 DEM 分辨率对坡度影响的研究, 主要集中在对坡度衰减表现的分析<sup>[7,11]</sup>、变化原因的

探究<sup>[12-13]</sup>、坡度尺度变换方法的探索<sup>[14-15]</sup>等方面。已有的关于最优坡度算法的研究, 集中在对算法精度对比<sup>[16-17]</sup>、在频率域探究算法优劣<sup>[10]</sup>、新算法提出<sup>[18]</sup>等方面, 还有研究者分析了分辨率和地貌类型的影响<sup>[19]</sup>。但是关于 DEM 分辨率对坡度算法选择影响的研究仍有待深入分析。

基于此, 本文以绥德和拜泉两个样区为研究区, 生成 10 ~ 200 m 分辨率 DEM, 从误差、信息熵、坡度衰减三个角度, 研究在不同 DEM 分辨率下坡度的最优算法, 以期对算法选择和坡度精度评价提供参考。

收稿日期 (Received date): 2020 - 06 - 08; 改回日期 (Accepted date): 2020 - 07 - 15

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (41371274, 41601290)。[National Natural Science Foundation of China (41371274, 41601290)]

作者简介 (Biography): 师动 (1992 -), 女, 陕西咸阳人, 博士研究生, 主要研究方向: 地理信息科学。[SHI Dong (1992 -), female, born in Xianyang, Shaanxi province, Ph. D. candidate, research on geographic information science] E-mail: shidongsd@stumail.nwu.edu.cn

\* 通讯作者 (Corresponding author): 杨勤科 (1962 -), 男, 陕西陇县人, 博士, 教授, 主要研究方向: 区域土壤侵蚀评价和侵蚀地形分析。[YANG Qinke (1962 -), male, born in Longxian, Shaanxi province, Ph. D., professor, research on regional soil erosion evaluation and erosion topography analysis] E-mail: qkyang@nwu.edu.cn

# 1 研究区概况与研究方法

## 1.1 研究区概况

本文以黄土丘陵绥德和东北漫岗丘陵拜泉两个样区为研究区(图1),绥德样区为大起伏丘陵区,拜泉样区为小起伏丘陵区,两个样区土壤侵蚀和水土流失严重,生态环境脆弱,坡度结果差异较大并且对比明显,对描述不同分辨率下坡度结果与算法之间关系具有代表性。绥德样区位于陕西省韭园沟流域,地处黄土高原丘陵沟壑区,平均高程约1019.1 m,平均坡度约24.6°,面积约141.0 km<sup>2</sup>,地形破碎且复杂,侵蚀类型以坡耕地侵蚀和沟蚀为主。拜泉样区位于黑龙江省罗家屯流域,地处小兴安岭余脉与松嫩平原的过渡地带,平均高程约272.0 m,平均坡度约为1.9°,面积约为549.0 km<sup>2</sup>,地形平缓且简单,侵蚀类型以长坡耕地侵蚀和沟蚀为主。

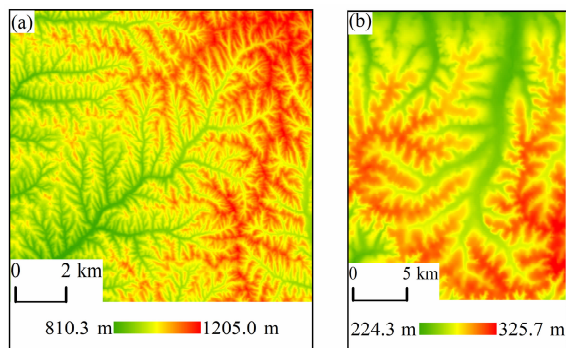


图1 研究区 DEM:(a)绥德样区;(b)拜泉样区

Fig. 1 DEM of two study areas:

(a) Suide in China ;(b) Baiquan in China

## 1.2 源数据及 DEM 的生成

源数据是由国家测绘与地理信息中心制作的1:5万比例尺地形图,该数据采用 Xian80 地理坐标系,Gauss Kruger 投影,1985 年国家高程基准。此地形图的垂直误差在丘陵区控制在5 m 以内,在山区控制在8 m 以内<sup>[20]</sup>。

参考已有研究<sup>[21]</sup>,绥德样区的适宜分辨率为10 m,拜泉样区的适宜分辨率为5 m。为便于对比分析,分辨率序列均从10 m 开始。基于各个样区1:5 万地形图数据(主要是等高线和高程点)、使用 ANUDEM 软件插值生成10 m、20 m、40 m、60 m、80 m、100 m、120 m、140 m、160 m、180 m 和200 m

分辨率 DEM<sup>[22]</sup>。

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 坡度计算

坡度计算公式如式(1)<sup>[1]</sup>:

$$\theta = \arctan(p^2 + q^2)^{1/2} \times \frac{180}{\pi} \quad (1)$$

式中, $\theta$  为坡度(°),值域为0°~90°; $p$  和 $q$  是高程梯度,指 DEM 表面高程 $z$  在 $x$  和 $y$  两个方向上的变化率<sup>[1]</sup>,无量纲;180/ $\pi$  是弧度转角度的换算系数。

高程梯度的计算选取广泛使用且具有代表性的五种算法,分别为 Horn 算法、Zevenbergen 算法、Evans-Young 算法、Sobel 算法和 Sharpnack 算法<sup>[10]</sup>,在本文中将它们分别缩写为 H 算法、Z 算法、EY 算法、Sb 算法和 Sp 算法,计算公式见表1<sup>[10]</sup>。

表1 五种算法计算公式

Tab. 1 The formulae of five algorithms

算法名称	公式	公式编号
H	$p = \frac{z_5 - z_4}{w}$	(2a)
	$q = \frac{z_5 - z_8}{w}$	(2b)
Z	$p = \frac{z_6 - z_4}{2 \times w}$	(3a)
	$q = \frac{z_2 - z_8}{2 \times w}$	(3b)
EY	$p = \frac{z_3 + z_6 + z_9 - z_1 - z_4 - z_7}{6 \times w}$	(4a)
	$q = \frac{z_1 + z_2 + z_3 - z_7 - z_8 - z_9}{6 \times w}$	(4b)
Sb	$p = \frac{z_3 + 2z_6 + z_9 - z_1 - 2z_4 - z_7}{8 \times w}$	(5a)
	$q = \frac{z_1 + 2z_2 + z_3 - z_7 - 2z_8 - z_9}{8 \times w}$	(5b)
Sp	$p = \frac{z_3 - z_1 + \sqrt{2} \times (z_6 - z_4) + z_9 - z_7}{(4 + 2 \times \sqrt{2}) \times w}$	(6a)
	$q = \frac{z_1 - z_7 + \sqrt{2} \times (z_2 - z_8) + z_3 - z_9}{(4 + 2 \times \sqrt{2}) \times w}$	(6b)

注:公式中,3×3 窗口中 Z 值编号是按先行后列的原则, $w$  为像元大小,单位是 m。

H 算法是坡度的基本定义,然而其中心不在中心像元( $Z_5$ ) 处,对于 $p$  来说,它在 $x$  方向上偏移了 $w/2$ (半个像元),对于 $q$  来说,它在 $y$  方向上偏移了 $w/2$ (半个像元)。其中,EY 算法、Sb 算法、Sp 算法均使用局部3×3 窗口中的六个像元,这三个算法最为相似。

### 1.3.2 误差推导与计算

误差是指由于一些客观因素影响,测量或实验所得数据与被测量的真值之间的差异。各误差因素是按一定的传递关系作用至最后测量结果<sup>[23]</sup>。如果 DEM 的误差是随机的, $p$  和  $q$  互相独立<sup>[24]</sup>,根据不同算法的计算公式(式(2)~式(6)),坡度计算公式(式(1))和误差传播定律<sup>[23]</sup>,推导得出不同算法计算得到的坡度中误差公式(式(7)~式(11))如下:

$$m_{\theta H}^2 = \frac{1}{(1+p^2+q^2)^2} \times \frac{180}{\pi} \times 2 \times \frac{m_z^2}{w^2} \quad (7)$$

$$m_{\theta Z}^2 = \frac{1}{(1+p^2+q^2)^2} \times \frac{180}{\pi} \times \frac{1}{2} \times \frac{m_z^2}{w^2} \quad (8)$$

$$m_{\theta EY}^2 = \frac{1}{(1+p^2+q^2)^2} \times \frac{180}{\pi} \times \frac{1}{6} \times \frac{m_z^2}{w^2} \quad (9)$$

$$m_{\theta Sb}^2 = \frac{1}{(1+p^2+q^2)^2} \times \frac{180}{\pi} \times \frac{3}{16} \times \frac{m_z^2}{w^2} \quad (10)$$

$$m_{\theta Sp}^2 = \frac{1}{(1+p^2+q^2)^2} \times \frac{180}{\pi} \times \frac{1}{3+2\sqrt{2}} \times \frac{m_z^2}{w^2} \quad (11)$$

式中, $m_{\theta H}^2$  为 H 算法计算得到的坡度中误差的平方,H 代表 H 算法计算得到的坡度,其余算法类似; $w$  为栅格大小(m); $m_z^2$  为高程中误差的平方; $180/\pi$  为弧度转角度的换算系数。

首先计算  $p$  和  $q$ (式(2)~式(6)),再通过坡度中误差公式(式(7)~式(11))得到某个分辨率下某个样区五种算法坡度中误差平方的表面。统计这些表面的期望和方差<sup>[25]</sup>,即为误差的误差,也称作精密度。通过比较,如果某种算法计算得到的坡度中误差平方表面的期望或者方差值越小,说明精密程度越高,算法越好。

### 1.3.3 统计指标

#### (1) 信息熵

信息熵是一种能够定量衡量表面信息量的指标<sup>[26]</sup>。同一分辨率下,不同算法计算得到的坡度信息熵不同,信息熵越大,表明坡度所含的信息越多,能够更为完整的反映地形,说明该算法计算得到的坡度较好。计算公式如下:

$$H = - \sum p_i(x) \ln p_i(x) \quad (12)$$

式中, $H$  为信息熵; $p_i(x)$  为图像的频率,即坡度值的频率; $\ln p_i(x)$  为频率的自然对数。

#### (2) 坡度衰减

坡度衰减是指随着 DEM 分辨率的降低,坡度平均值和标准差明显降低的这种事实<sup>[7,12]</sup>。因此,本文统计不同算法计算得到的坡度平均值和标准差随着 DEM 分辨率降低的衰减情况,衰减得越小,说明该算法越好。

#### (3) 不同算法坡度差异度

在同一分辨率下,五种算法计算得到的坡度信息熵不同;随着 DEM 分辨率的变化,不同算法计算得到的坡度信息熵的差异程度不同。为了衡量分辨率对不同算法计算得到的坡度信息熵差异程度的影响,将这种差异程度用  $d$  值来衡量,计算公式如下:

$$d = \frac{\max_i - \min_i}{\min_i} \quad (13)$$

式中, $d$  为某一分辨率下五种算法计算得到坡度信息熵的差异程度; $\max_i$  为五种算法计算的坡度信息熵中的最大值; $\min_i$  为五种算法计算的坡度信息熵中的最小值。

## 2 结果与分析

### 2.1 坡度图像

五种算法计算得到的拜泉样区 10 m 和 200 m 分辨率坡度图像如图 2 和图 3 所示。由于篇幅限制,只展示这两组图像,拜泉样区其他分辨率与绥德样区各个分辨率的坡度图像与所展示的图像变化规律类似,这里不再罗列。从图 2、图 3 可以看出,不论是 10 m 分辨率,还是 200 m 分辨率,在同一分辨率下五种算法都能用于坡度计算,坡度图像差异难以区分,其差异只表现在图像值域等统计值上。同时可以发现,随着 DEM 分辨率的降低,五种算法计算得到的坡度图像都变得平滑,坡度的值域都减小,坡度发生衰减。

### 2.2 坡度的误差

绥德和拜泉样区五种算法计算得到的坡度中误差平方表面的期望和方差如表 2~表 4 所示,两个样区的规律类似。不同分辨率下,算法计算得到的坡度结果的排序也类似。绥德样区和拜泉样区在所有分辨率下,五种算法计算得到的坡度中误差平方表面的期望和方差的排序均为 EY 算法 < Sp 算法 < Sb 算法 < Z 算法 < H 算法。因此,从误差角度来看,在所有分辨率下 EY 算法误差最小,该算法最优。

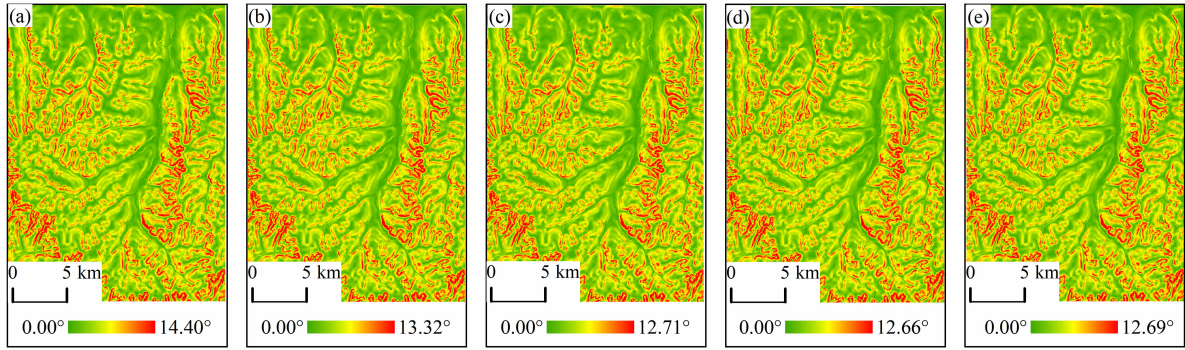


图 2 拜泉样区 10 m 分辨率五种算法计算得到的坡度图像:

(a) H 算法;(b) Z 算法;(c) EY 算法;(d) Sb 算法;(e) Sp 算法

Fig.2 Slope images of five algorithms with 10 m resolution in Baiquan:

(a) H algorithm; (b) Z algorithm; (c) EY algorithm; (d) Sb algorithm; (e) Sp algorithm

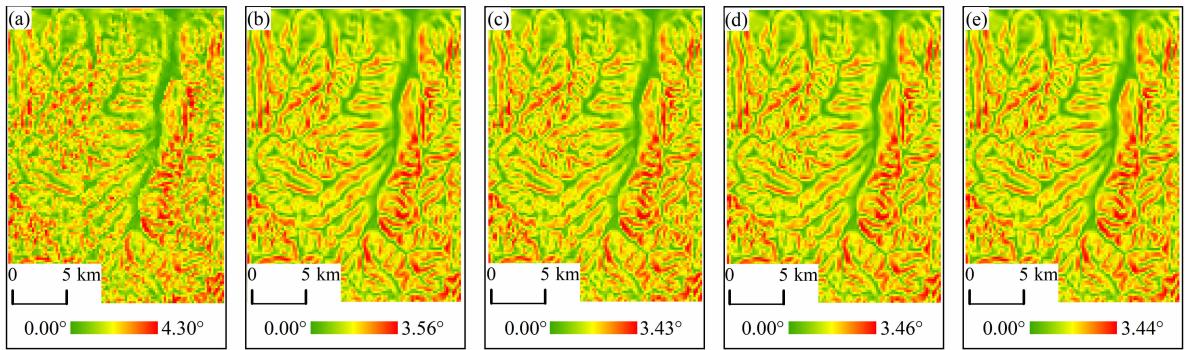


图 3 拜泉样区 200 m 分辨率五种算法计算得到的坡度图像:

(a) H 算法;(b) Z 算法;(c) EY 算法;(d) Sb 算法;(e) Sp 算法

Fig.3 Slope images of five algorithms with 200 m resolution in Baiquan:

(a) H algorithm; (b) Z algorithm; (c) EY algorithm; (d) Sb algorithm; (e) Sp algorithm

表 2 两个样区五种算法坡度中误差平方表面的期望统计表

Tab.2 The expected value of square error surface of slope of five algorithms in two study areas

分辨率/ m	绥德样区					拜泉样区				
	H 算法	Z 算法	EY 算法	Sb 算法	Sp 算法	H 算法	Z 算法	EY 算法	Sb 算法	Sp 算法
10	17.303775	4.363323	1.462966	1.643493	1.504985	0.137275	0.034315	0.011435	0.012865	0.011772
20	6.776845	1.734681	0.586394	0.657532	0.602695	0.056851	0.014209	0.004733	0.005326	0.004873
40	5.399676	1.392540	0.473061	0.529898	0.485974	0.021576	0.005390	0.001795	0.002017	0.001847
60	5.050620	1.304714	0.442728	0.496125	0.454907	0.015657	0.003911	0.001299	0.001464	0.001339
80	5.163985	1.330159	0.450151	0.504798	0.462693	0.012413	0.003104	0.001035	0.001164	0.001065
100	4.342868	1.125772	0.381366	0.427686	0.392012	0.009927	0.002482	0.000827	0.000931	0.000852
120	5.070388	1.296432	0.436569	0.490135	0.448984	0.010494	0.002624	0.000875	0.000984	0.000900
140	4.555868	1.162114	0.390651	0.438758	0.401834	0.012283	0.003071	0.001024	0.001152	0.001054
160	4.296012	1.093702	0.367259	0.412574	0.377815	0.014384	0.003597	0.001199	0.001349	0.001234
180	3.867876	0.982496	0.329384	0.370149	0.338901	0.013971	0.003494	0.001165	0.001310	0.001199
200	5.284276	1.339634	0.448832	0.504476	0.461844	0.011853	0.002964	0.000988	0.001112	0.001017

表 3 绥德样区五种算法坡度中误差平方表面的方差统计表

Tab.3 The variance of square error surface of slope of five algorithms in Suide

分辨率/m	H 算法	Z 算法	EY 算法	Sb 算法	Sp 算法
10	25.774857	1.583652	0.172598	0.219456	0.183317
20	2.817487	0.169336	0.017872	0.022880	0.019043
40	1.025084	0.052471	0.005192	0.006746	0.005571
60	0.443384	0.021562	0.001992	0.002624	0.002151
80	0.260739	0.011941	0.001038	0.001383	0.001126
100	0.135163	0.006214	0.000483	0.000654	0.000528
120	0.103398	0.004097	0.000318	0.000432	0.000348
140	0.057320	0.002170	0.000164	0.000223	0.000180
160	0.037983	0.001332	0.000096	0.000132	0.000106
180	0.020790	0.000698	0.000050	0.000068	0.000055
200	0.022426	0.000728	0.000050	0.000068	0.000055

由式(7)~式(11)可以看出,在特定样区特定分辨率下, $w$  相同, $m_z^2$  相同,坡度中误差的平方主要取决于公式的系数与  $p$  和  $q$ 。公式的系数排序为: EY 算法 < Sp 算法 < Sb 算法 < Z 算法 < H 算法。EY 算法、Sb 算法、Sp 算法这三个算法公式系数、 $p$  和  $q$  值均十分接近。因此,它们计算得到的坡度中误差平方表面十分接近,其期望、方差也十分接近。Z 算法公式系数大于 EY 算法、Sb 算法、Sp 算法这组算法,所以得到的坡度中误差平方表面的期望、方

差大于 EY 算法、Sb 算法、Sp 算法这组算法。而 H 算法公式系数最大,其存在半个像元( $w/2$ )的偏移,误差较大,故得到的坡度中误差平方表面的期望、方差都远大于其他算法。

对不同算法计算得到的坡度中误差平方表面的方差来说,在高分辨率时,不同算法的结果差异不大,选取哪种算法影响不大;而低分辨率时,不同算法的结果差异非常大,此时算法选择需慎重。

2.3 坡度的信息熵

绥德和拜泉样区五种算法计算得到的坡度信息熵如表 5 所示,两个样区的规律类似。不同分辨率下,算法计算得到的坡度信息熵大小的排序也类似。绥德样区和拜泉样区,在所有分辨率下五种算法计算得到的坡度信息熵排序均为 H 算法 > Z 算法 > Sb 算法 > Sp 算法 > EY 算法。因此,从信息熵的角度来看,在所有分辨率下,H 算法计算得到的坡度信息熵最大,所含的信息多,能够更为完整的反映地形并表达更多细节,该算法最优。DEM 分辨率对最优算法选择影响不大。EY 算法、Sb 算法、Sp 算法的  $p$  和  $q$  结果非常接近,坡度由  $p$  和  $q$  计算得到,所以 EY 算法、Sb 算法、Sp 算法计算得到的坡度信息熵结果非常接近。

虽然 DEM 分辨率对最优算法选择影响不大,但是 DEM 分辨率会对不同算法计算得到的坡度信息熵的差异程度( $d$ 值)产生影响。绥德样区 10m 分

表 4 拜泉样区五种算法坡度中误差平方表面的方差统计表

Tab.4 The variance of square error surface of slope of five algorithms in Baiquan

分辨率/m	H 算法	Z 算法	EY 算法	Sb 算法	Sp 算法
10	3.334125E-07	2.061807E-08	2.271902E-09	2.881219E-09	2.409992E-09
20	4.731275E-08	2.885234E-09	3.143077E-10	3.997281E-10	3.338665E-10
40	5.121349E-09	2.999002E-10	3.168205E-11	4.059199E-11	3.377400E-11
60	2.017195E-09	1.124489E-10	1.151265E-11	1.485841E-11	1.231580E-11
80	9.974634E-10	5.277392E-11	5.234882E-12	6.805048E-12	5.619336E-12
100	4.765929E-10	2.406711E-11	2.332275E-12	3.046542E-12	2.509233E-12
120	4.479483E-10	2.128207E-11	2.004332E-12	2.634738E-12	2.162854E-12
140	4.933800E-10	2.233927E-11	2.059983E-12	2.719860E-12	2.227492E-12
160	5.493809E-10	2.414885E-11	2.182341E-12	2.893969E-12	2.364630E-12
180	4.112965E-10	1.748558E-11	1.559007E-12	2.071969E-12	1.690871E-12
200	2.308452E-10	9.707716E-12	8.596793E-13	1.142969E-12	9.324609E-13

表 5 两个样区五种算法计算得到的坡度信息熵统计表

Tab.5 Entropy of slope of five algorithms in two study areas

分辨率/m	绥德样区					拜泉样区				
	H 算法	Z 算法	EY 算法	Sb 算法	Sp 算法	H 算法	Z 算法	EY 算法	Sb 算法	Sp 算法
10	8.280147	8.277432	8.270158	8.271855	8.270933	6.085774	6.084700	6.083737	6.084003	6.083865
20	8.175855	8.172381	8.156037	8.159804	8.157817	6.076809	6.073448	6.070609	6.071301	6.070953
40	8.070840	8.002440	7.966152	7.975326	7.970464	6.044079	6.032394	6.022926	6.025270	6.024004
60	7.861535	7.789253	7.734826	7.748059	7.741710	5.994827	5.971704	5.956782	5.958830	5.958113
80	7.688004	7.608856	7.539091	7.552437	7.547180	5.945360	5.909762	5.884138	5.889789	5.886822
100	7.537646	7.492832	7.400664	7.419571	7.406914	5.877058	5.828782	5.797194	5.804697	5.800611
120	7.409086	7.298705	7.200734	7.219060	7.212653	5.837558	5.771592	5.732101	5.740229	5.736321
140	7.276197	7.167188	7.063594	7.091342	7.069407	5.785088	5.704431	5.657252	5.668430	5.663597
160	7.162294	7.050129	6.945524	6.966974	6.951799	5.733902	5.643470	5.589329	5.601063	5.596500
180	7.057187	6.923913	6.822058	6.840928	6.834342	5.675013	5.573876	5.518405	5.530396	5.525335
200	6.883789	6.759965	6.653225	6.667124	6.654896	5.606094	5.502835	5.443907	5.455392	5.447467

分辨率下不同算法坡度信息熵差异度  $d$  值是 0.0012, 200 m 分辨率下不同算法坡度信息熵差异度  $d$  值是 0.0347。拜泉样区 10 m 分辨率下不同算法坡度信息熵差异度  $d$  值是 0.0003, 200 m 分辨率下不同算法坡度信息熵差异度  $d$  值是 0.0298。随着 DEM 分辨率的降低,不同算法坡度信息熵差异度  $d$  值成倍增加。表明在高分辨率时,不同算法信息熵差异不大,算法的选取对坡度结果影响不大;而低分辨率时,不同算法信息熵差异较大,算法的选取对坡度结果影响大,此时算法选择需慎重。

### 2.4 坡度的衰减

绥德和拜泉样区五种算法计算得到的坡度平均值和标准差如图 4 ~ 图 7 所示,两个样区的规律类似。不同分辨率下,算法计算得到的坡度衰减的排序也类似。绥德样区和拜泉样区坡度的平均值和标准差在所有分辨率下,五种算法计算得到的坡度衰减的排序均为:H 算法 < Z 算法 < Sb 算法 < Sp 算法 < EY 算法。从坡度衰减(平均值、标准差)的角度来看,在所有分辨率下,H 算法衰减最小,该算法最优。DEM 分辨率对最优算法选择影响不大。随着 DEM 分辨率的降低,五种算法计算的坡度均发生衰减,但是衰减程度不同。

各种分辨率下,不同算法计算得到的坡度平均值、标准差的差异程度不同。在高分辨率时,不同算法计算得到的坡度平均值、标准差曲线都很接近,说

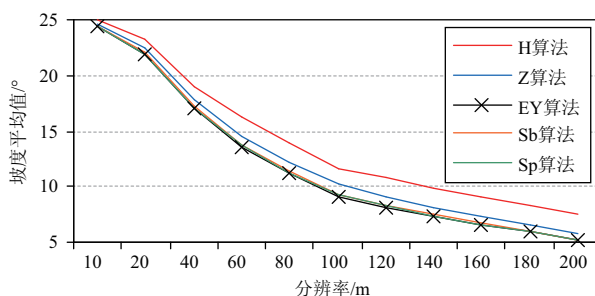


图 4 绥德样区五种算法计算得到的坡度平均值衰减图

Fig.4 Mean slope attenuation for five algorithms in Suide

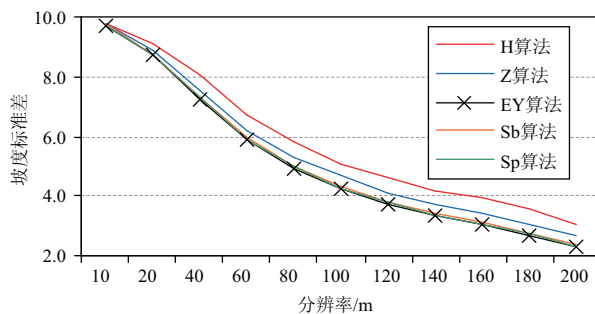


图 5 绥德样区五种算法计算得到的坡度标准差衰减图

Fig.5 Slope standard deviation attenuation for five algorithms in Suide

明不同算法计算得到的坡度平均值、标准差差异不大,算法的选取对结果的影响不大;低分辨率时,不同算法计算得到的坡度平均值、标准差曲线相差较大,算法的选取对结果影响较大,说明在低分辨率时

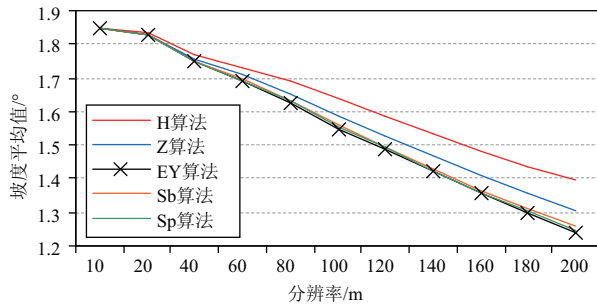


图 6 拜泉样区五种算法计算得到的坡度平均值衰减图

Fig. 6 Mean slope attenuation for five algorithms in Baiquan

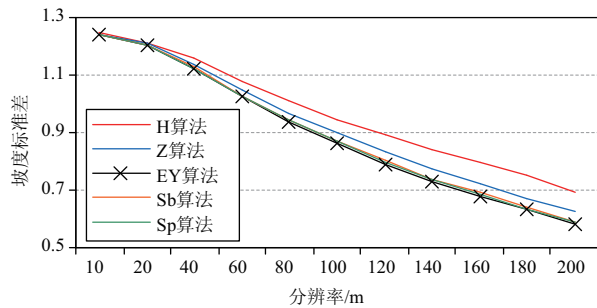


图 7 拜泉样区五种算法计算得到的坡度标准差衰减图

Fig. 7 Slope standard deviation attenuation for five algorithms in Baiquan

算法的选取需谨慎。

### 3 讨论

众多研究表明,坡度的计算受到 DEM 分辨率的影响<sup>[7-9]</sup>。但是大多数关于尺度效应的研究均针对单一的算法展开,或在单一的分分辨率下对坡度算法进行对比<sup>[16-17,27]</sup>。本文在一个比较完整的 DEM 分辨率系列上(10~200 m),对坡度算法的表现进行分析并给出最优算法,是对坡度最优算法的一种新尝试。这对低分辨率数据在全球范围<sup>[28]</sup>、区域范围<sup>[29]</sup>和小区域的局地尺度上<sup>[30]</sup>计算坡度时算法的选取具有指导意义,还为土壤侵蚀评价等研究提供了更精确的坡度数据,因此本研究是对前人研究的补充和深化。

本文基于 1:5 万地形图数据插值生成 DEM,其基本出发点是认为地表是光滑的表面,但事实上在自然和人为作用下,地形的突变是客观存在的,如断裂带(线)和梯田等。随着科学技术的进步,高分辨率下(1~5 m)对地形的高精度(高保真)表达已经

成为可能,如美国已有大面积 1/9 弧秒的 DEM 数据。基于这种高分辨率、对突变地形有所表达的 DEM 数据<sup>[31-32]</sup>,坡度的最优算法是否有所不同仍是值得进一步研究的内容。

在目前的研究中,坡度的计算大多基于 3×3 邻域窗口实现<sup>[10,16-17,27]</sup>,本文选取的五种坡度算法也均为基于 3×3 窗口的算法。FLORINSKY 的研究表明,坡度计算精度会受到分析窗口大小的影响,并且已经提出了基于 5×5 邻域窗口的坡度算法<sup>[2]</sup>。在 5×5 邻域窗口甚至更大邻域窗口下,坡度的较优算法的对比有待后续进一步研究。

### 4 结论

(1) 根据不同要求,选取的最优算法不同。根据误差结果,各种分辨率下 Evans-Young(EY)误差均最小,该算法均为最优;根据信息熵和坡度衰减(平均值、标准差)结果,各种分辨率下 Horn(H)算法信息熵均最大,坡度衰减均最小,该算法均为最优。

(2) DEM 分辨率对算法的影响主要表现在其坡度计算结果的差异程度上。在高分辨率时,不同算法计算得到的坡度结果差异不大,算法的选择对坡度结果影响较小;而在低分辨率时,不同算法计算得到的坡度结果差异很大,算法的选择对坡度结果影响非常大,建议在低分辨率时使用推荐的算法。

(3) 随着 DEM 分辨率的降低,五种算法计算得到的坡度均发生衰减,但是衰减程度不同,其中 Horn(H)算法的衰减最小。

(4) 在实际坡度计算时,若重点关注坡度的精度,则优先考虑选用 Evans-Young(EY)算法;如重点关注低分辨率情形下坡度的衰减,则优先考虑选用 Horn(H)算法。

### 参考文献(References)

- [1] OLAYA V. Basic land-surface parameters [M]// HENGL T, REUTER H. Geomorphometry concepts, software, applications. Amsterdam: Elsevier, 2009:141-170.
- [2] FLORINSKY I V. Digital terrain analysis in soil science and geology [M]. 2nd ed. Elsevier Science: New York, 2016: 17-26.
- [3] SHAN Linxin, YANG Xihua, ZHU Qinggaozi. Effects of DEM resolutions on LS and hillslope erosion estimation in a burnt landscape [J]. Soil Research, 2019, 57(7):797-804.

- [4] 郭长宝,唐杰,吴瑞安,等. 基于证据权模型的川藏铁路加查——朗县段滑坡易发性评价[J]. 山地学报, 2019, **37**(2): 240 – 251. [GUO Changbao, TANG Jie, WU Ruian, et al. Landslide susceptibility assessment based on WOE model along Jiacha——Langxian county section of Sichuan—Tibet railway, China [J]. Mountain Research, 2019, **37**(2): 240 – 251]
- [5] 刘永垚,第宝锋,詹宇,等. 基于随机森林模型的泥石流易发性评价——以汶川地震重灾区为例[J]. 山地学报, 2018, **36**(5): 765 – 773. [LIU Yongyao, DI Baofeng, ZHAN Yu, et al. Debris flows susceptibility assessment in Wenchuan earthquake areas based on random forest algorithm model [J]. Mountain Research, 2018, **36**(5): 765 – 773]
- [6] LI Fuqin, JUPP D L B, THANKAPPAN M. Issues in the application of digital surface model data to correct the terrain illumination effects in landsat images [J]. International Journal of Digital Earth, 2013, **8**(3): 235 – 257.
- [7] 张宏鸣,杨勤科,王猛,等. 梯田区侵蚀地形因子随 DEM 分辨率变化的特征分析[J]. 农业机械学报, 2017, **48**(10): 177 – 184. [ZHANG Hongming, YANG Qinke, WANG Meng, et al. Analysis of DEM resolution on erosional terrain characteristic of terrace area [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, **48**(10): 177 – 184]
- [8] MUKHERJEE S, MUKHERJEE S, GARG D A, et al. Evaluation of topographic index in relation to terrain roughness and DEM grid spacing [J]. Journal of Earth System Science, 2013, **122**(3): 869 – 886.
- [9] GROHMANN C H. Effects of spatial resolution on slope and aspect derivation for regional-scale analysis [J]. Computers & geosciences, 2015, **77**: 111 – 117.
- [10] SHI Dong, YANG Qinke, ZHU Qifeng, et al. Uncertainties and errors in algorithms for elevation gradients [J/OL]. International Journal of Geographical Information Science, 2020: 1 – 25 [2020 – 06 – 03]. <https://doi.org/10.1080/13658816.2020.1766047>.
- [11] 李思进,代文,熊礼阳,等. DEM 分辨率对黄土侵蚀沟形态特征表达的不确定性分析[J]. 地球信息科学学报, 2020, **22**(3): 338 – 350. [LI Sijin, DAI Wen, XIONG Liyang, et al. Uncertainty of the morphological feature expression of loess erosional gully affected by DEM resolution [J]. Journal of Geographical Information Science, 2020, **22**(3): 338 – 350]
- [12] WANG Chunmei, YANG Qinke, JUPP D L B, et al. Modeling change of topographic spatial structures with DEM resolution using semi-variogram analysis and filter bank [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2016, **5**(7): 107 – 128.
- [13] 土祥,王春梅,庞国伟,等. 黄土丘陵沟壑区坡度尺度效应空间分异分析[J]. 山地学报, 2018, **36**(6): 964 – 972. [TU Xiang, WANG Chunmei, PANG Guowei, et al. On the spatial differentiation of scale effect of slopes in Loess Hill and gully region, China [J]. Mountain Research, 2018, **36**(6): 146 – 154]
- [14] 刘飞,范建容,崔兆岩,等. 基于 DEM 分形特征的坡度尺度变换模型[J]. 山地学报, 2019, **37**(1): 129 – 136. [LIU Fei, FAN Jianrong, CUI Zhaoyan, et al. A model of re-scaling slope based on DEM fractal feature [J]. Mountain Research, 2019, **37**(1): 129 – 136]
- [15] 张宏鸣,宋泽鲁,杨江涛,等. DEM 超分辨率重构对梯田坡度提取的影响研究[J]. 农业机械学报, 2017, **48**(1): 112 – 118. [ZHANG Hongming, SONG Zelu, YANG Jiangtao, et al. Influence of DEM super-resolution reconstruction on terraced field slope extraction [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, **48**(1): 112 – 118]
- [16] FLORINSKY I V. Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models [J]. International Journal of Geographical Information Science, 1998, **12**(1): 47 – 62.
- [17] 刘学军,卞璐,卢华兴,等. 顾及 DEM 误差自相关的坡度计算模型精度分析[J]. 测绘学报, 2008, **37**(2): 200 – 206. [LIU Xuejun, BIAN Lu, LU Huaxing, et al. The accuracy assessment on slope algorithm with DEM error spatial autocorrelation [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2008, **37**(2): 200 – 206]
- [18] 袁兵,王彬权,袁光银,等. 基于 DEM 的对称 13 点局部窗口坡度算法分析[J]. 山地学报, 2019, **37**(1): 137 – 143. [YUAN Bing, WANG Binquan, YUAN Guangyin, et al. Slope computation analysis of symmetric 13 nodes local window based on grid DEM [J]. Mountain Research, 2019, **37**(1): 137 – 143]
- [19] 刘晓,赵荣,梁勇,等. 顾及地貌与 DEM 分辨率的坡度算法适应性研究[J]. 测绘科学, 2017, **42**(3): 29 – 34. [LIU Xiao, ZHAO Rong, LIANG Yong, et al. Research of algorithms for deriving slope based on different geomorphic types and DEM resolution [J]. Science of Surveying and Mapping, 2017, **42**(3): 29 – 34]
- [20] GB/T 17278 – 2009. 数字地形图产品基本要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009. [GB/T 17278 – 2009. Basic requirement for products of digital topographic map [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009]
- [21] 何珊,王春梅,杨勤科. 1:50000 DLG 建立 DEM 适宜栅格尺寸的确定[J]. 山地学报, 2017, **35**(4): 572 – 579. [HE Shan, WANG Chunmei, YANG Qinke. Optimizing cellsize for DEM generation with 1:50000 DLG [J]. Mountain Research, 2017, **35**(4): 572 – 579]
- [22] YANG Qinke, MCVICAR T R, VANNIEL T G, et al. Improving a digital elevation model by reducing source data errors and optimising interpolation algorithm parameters: an example in the Loess Plateau, China [J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2007, **9**(3): 235 – 246.
- [23] 李天文. 现代测量学[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2014:

- 142–158. [LI Tianwen. Modern surveying [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2014; 142–158]
- [24] 朱奇峰, 杨勤科, 龙永清, 等. 高程梯度性质和算法不确定性的初步分析[J]. 水土保持研究, 2017, **24**(4): 19–26. [ZHU Qifeng, YANG Qinke, LONG Yongqing, et al. Preliminary properties and precision analysis of elevation gradient algorithm [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, **24**(4): 19–26]
- [25] 刘爱利, 王培法, 丁园圆. 地统计学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2012; 14–24. [LIU Aili, WANG Peifa, DING Yuanyuan. The introduction to Geostatistics [M]. Beijing: Science Press, 2012; 14–24]
- [26] 陶畅, 汤国安, 王春, 等. DEM 子集划分对地形信息量计算的影响研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2009, **34**(12): 1463–1466. [TAO Yang, TANG Guoan, WANG Chun, et al. Influence of DEM subset partition on terrain information content [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, **34**(12): 1463–1466]
- [27] SKIDMORE A K. Evolution of methods for estimating slope gradient and aspect from digital elevation models [M]// FISHER P. Classics from IJGIS: twenty years of the international journal of geographical information science and systems. Boca Raton: Taylor and Francis Group, 2007; 111–118.
- [28] BORRELLI P, ROBINSON D A, FLEISCHER L R, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion [J]. Nature Communications, 2017, **8**(1): 1–13.
- [29] TENG H, ROSSEL R A V, SHI Z, et al. Assimilating satellite imagery and visible-near infrared spectroscopy to model and map soil loss by water erosion in Australia [J]. Environmental Modelling & Software, 2016, **77**: 156–167.
- [30] 黄婷婷, 史扬子, 曹琦, 等. 黄土高原六道沟小流域近30年来土壤侵蚀变化评价[J]. 中国水土保持科学, 2020, **18**(1): 8–17. [HUANG Tingting, SHI Yangzi, CAO Qi, et al. Soil erosion evaluation of Liudaogou catchment in the Loess Plateau during the past 30 years [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, **18**(1): 8–17]
- [31] 罗仪宁. DEM 表面地形突变特征表达方法研究[D]. 西安: 西北大学, 2011: 17–23. [LUO Yining. Study on the representation method of discontinuous terrain features on the DEM surface [D]. Xi'an: Northwest University, 2011: 17–23]
- [32] TAROLLI P, MUDD S M. Remote sensing in geomorphology [M]. Amsterdam: Elsevier, 2020: 317–338.

## DEM Resolution Influence on Slope Algorithm Selection

SHI Dong<sup>1</sup>, ZHU Qifeng<sup>2</sup>, YANG Qinke<sup>1\*</sup>, LONG Yongqing<sup>1</sup>

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2. Shaanxi Institute of Zoology, Xi'an 710032, China)

**Abstract:** The DEM-based calculation of slope, as an essential terrain variable, is affected by DEM resolution. The influence of DEM resolution on optimal slope algorithm should be studied to improve the slope calculation accuracy. In this paper, two study areas Suide with complex terrain and Baiquan with simple terrain in China were selected to generate a series of DEMs with resolutions ranging from 10 m to 200 m. Then, the slope calculation error, the slope entropy, and slope attenuation of five slope algorithms, including the Horn (H), the Zevenbergen (Z), the Evans – Young (EY), the Sobel (Sb), and the Sharpnack (Sp) algorithms were compared with DEM resolutions to understand the resolution influence on slope algorithm selection. The results obtained: (1) In each case according to the error results, the EY algorithm was the best choice in each resolution. In contrast, according to entropy and the mean and standard deviations of slope attenuation results, the H algorithm was the best choice in each resolution. (2) The DEM resolution influence on the algorithm could be mainly reflected in different slope difference results. The slope results obtained by different algorithms for high resolutions were not entirely different, while those calculated for low resolutions were quite different. Thus, the optimal algorithm should be utilized in low-resolution cases. (3) As DEM resolution became coarser, the slope results calculated by these five algorithms

attenuated. However, different degrees of slope attenuation could be obtained with different algorithms, while the minimum attenuation was obtained with the H algorithm. (4) In practical slope calculation, the EY algorithm was preferred if the slope calculation accuracy was focused, while the H algorithm could be utilized if the slope reduction was considered in low-resolution DEM-based calculation. The research results were of great significance for slope algorithm selection at different resolutions and slope accuracy evaluation under different resolutions. Moreover, they provided more accurate slope data for geoscience models.

**Key words:** slope; algorithm; DEM resolution; error; slope attenuation

## 金沙江奔子栏—巧家河段的主要堰塞湖

张信宝 刘 彧

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所; 2. 中国科学院地球化学研究所)

金沙江干流展布受控于青藏高原东南缘的地质构造。沿川滇菱形断块西侧金沙江大断裂南流的金沙江,受断块南部楚雄—元谋隆起的阻挡,在石鼓附近折向东流,形成“长江第一湾”。位于金沙江断裂以西的澜沧江和怒江,因未受川滇菱形断块的影响,一直南流经东南亚入海。金沙江奔子栏—巧家河段的堰塞湖,自下游到上游主要有巧家湖、龙街湖、昔格达湖、涛源湖、大具湖、石鼓湖和奔子栏湖等。这些堰塞湖沉积均为大型河流的过水湖快速沉积,沉积相的最大特点是:粒度均一的厚层—巨厚层河湖相沉积,组成台地顶面的拔河高度多大于数十米,昔格达组拉蚌剖面拔河高度最大,可达 410 m。巨厚的湖相沉积有的紧邻河岸,直抵现代河床;有的由于后期侵蚀,出露下伏基岩。除孢子花粉外,几无其他化石,至今未发现哺乳动物化石。根据可信度较高的上覆风成沉积物和昔格达组底部砂层宇生核素  $^{10}\text{Be}$ — $^{26}\text{Al}$  埋藏年龄,金沙江奔子栏—巧家河段堰塞湖沉积物年龄上限为晚更新世,下限为早更新世晚期。第四纪以来的构造运动,特别是 0.8 Ma 以来的昆黄、共和运动,导致青藏高原东南缘的横断山脉快速隆升和冰冻圈形成,促进了堰塞湖的形成和溃决。考虑到冰冻圈出现的影响,金沙江奔子栏—巧家河段堰塞湖可能形成于 0.8 Ma(昆黄运动)以后,沉积物年龄为中—晚更新世。

详见本期《金沙江折向东流的地质背景、古堰塞湖沉积、第四纪河流演化》一文。