

基于 DEM 的坡长计算方法比较分析

曹龙熹, 符素华

(北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

摘 要: 坡长是重要的地形因子, 流域坡长的提取有多种方法, 国内应用到实际研究中的有基于格网的直接计算法和基于山脊线的快速计算法。以陕西省安塞县大南沟流域 5 m 分辨率 DEM 为数据源探讨这两种方法的提取精度, 分析可能存在的问题。在 ArcGIS 9.0 环境中分别用直接计算法和快速计算法进行坡长提取, 并与通过地形图量算的坡长进行比较分析。结果表明, 直接方法计算结果的合格率为 86.9%, 与量算值之间的相关系数为 0.800, 确定性系数为 0.520。快速计算法的合格率为 69.7%, 相关系数为 0.276, 确定性系数为 -0.150, 说明直接计算法的精度比快速计算法高。

关键词: DEM; 地形特征; 坡长计算; 坡长因子

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2007)05-0058-05

中图分类号: S157.1

A Comparison of Methods for Computing Slope Length Based on DEM

CAO Long-xi, FU Su-hua

(School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Slope length is an important topographic factor. There are various methods to extract the slope length factor of a watershed. Both of grid based direct calculation method and fast calculation method based on the ridge line have been used in practical research in China. Based on the DEM data of the Danangou watershed in Shaanxi Province, this study attempts to make a comparison of precision for the two methods, and analyze the problems that may exist. Results show that direct calculation method has the eligible ratio of 86.9% and model efficiency of 0.520, whereas fast calculation method has the eligible ratio of 69.7% and model efficiency of -0.150. It can be seen that direct calculation method is superior to fast calculation method. This study can serve the further research work on slope length calculation and other related fields.

Keywords: DEM; topographic feature; slope length calculation; slope length factor

坡长是水土保持、土壤侵蚀等研究中的重要地形因子之一。坡长通过影响坡面径流的流速和流量, 影响水流挟沙力, 进而影响土壤侵蚀强度。目前很多土壤侵蚀模型都将坡长作为其中的重要因子, 如 USLE (Universal Soil Loss Equation), RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), WEPP (Water Erosion Prediction Project), AGNPS (Agricultural Non-point Source) 等^[1-4]。USLE 中坡长的定义为从地表径流源点到坡度减小至有沉积出现地方之间的距离, 或到一个明显渠道之间的水平距离^[1]。在实际研究中, 因坡面形态非常复杂而不易考察完整坡面, 常将坡面作分段处理, 各分段对应于从该段底端到坡顶的坡长, 故坡长又可以定义为地面上一点沿水流方向

到其流向起点的最大地面距离在水平面上的投影长度^[5]。

传统认为最精确的坡长计算方法是进行实地测量, 而这在实际应用中有时是很困难或不现实的^[6]。随着计算机技术的发展和 GIS 研究方法的不断成熟, 坡长计算方法也得到了很大的改进。在 DEM 数据和 GIS 空间分析方法的支持下, 可以实现比较精确的坡长提取。

目前, 国内外许多学者对坡长的计算开展了研究。由于坡长对土壤侵蚀的影响多以坡长因子的形式表现在土壤侵蚀模型中, 这些研究既有实际坡长的计算也有坡长因子的计算。对实际坡长的计算研究有: Hickey 等人在流域水文分析方法基础上提出了

收稿日期: 2007-01-16

修回日期: 2007-04-21

基金项目: 国家重点基础研究发展计划课题(2007CB407204); 国家自然科学基金课题(40201031); 北京市优秀人才基金

作者简介: 曹龙熹(1982-), 男(汉族), 河南省汝南县人, 硕士, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: rfcix@mail.bnu.edu.cn。

非累计流量的直接计算方法(no-cumulative slope length, NCSL)^[6],计算每个格网单元到起点的最大累计水流长度来作为该格网到坡顶的坡长。该方法与 ArcGIS 中计算上游水流流路长度的算法原理基本一致^[7],由于坡长计算的特殊性,Hickey 方法在某些算法规则上有别于 ArcGIS 算法,主要表现为对起始点的长度赋值规则不同,ArcGIS 中赋值为 0,Hickey 方法按不同水流方向赋以相应的数值,更符合实际的坡长特征。另外,Hickey 方法可以通过中断因子的设置来判别出坡面到坡底结束的位置,从而在坡长累加过程中识别出完整的坡面。国内学者汤国安等在介绍 ArcView 空间分析应用时提出一种快速近似计算坡长的方法^[8],在假定坡面水流方向与山脊线垂直基础上,计算每个点沿垂直方向到山脊线的水平距离作为该点坡长的近似值。对坡长因子的研究包括 Desmet 和 Govers 等提出基于累计流量的单位汇水面积算法^[9],用单位等高线长度的上游汇水面积代替坡面长度,在此基础上对 USLE 中坡长因子进行改进,使之能够反映二维水流特征。此外还有 Mitasova 等提出的基于水流强度指数的间接算法^[10],通过构建输沙能力指标间接计算 USLE 中地形因子(LS)。在这些方法中,实际坡长的计算是进行坡长因子计算的前提,而且计算结果不仅可以用于土壤侵蚀研究,还能作为水文分析及其他研究的重要参数,参与相关的模型构建和计算过程,对实际坡长的计算精度进行讨论有重要意义。Hickey 提出的直接计算法和汤国安提出的快速近似计算法已经被国内学者在研究中应用^[11-13]。与传统方法相比,它们提高了坡长计算的效率,但由于地形因子提取的复杂性及方法本身可能存在的问题,会导致某些计算误差,故需要对计算精度进行讨论。本文以陕西省安塞县大南沟 DEM 数据为数据源,在 ArcGIS 9.0 中分别用直接计算方法和快速提取方法进行坡长计算,并以由地形图量算得到的坡长数据为真值,拟对比两种方法的计算精度,找出比较准确的坡长计算方法,并分析每种方法误差产生的可能原因。本研究可为与地形特征分析相关的进一步研究提供依据。

1 研究方法及资料

1.1 研究区概况和数据准备

大南沟流域地处陕北黄土丘陵沟壑区,位于安塞县城西北约 7.5 km 处,属延河的一级支流,流域面积约 3.6 km²,海拔 327~1 100 m。属暖温带半干旱气候区,年均温 9℃,年均降雨量 549 mm。流域内地形破碎,沟壑密度达 6.9 km/km²。地势起伏率和坡

度都很大,沟壑频繁相间,土壤侵蚀强烈,塑造成典型的梁状黄土丘陵地貌和复杂多样的土地类型。流域内部地势相对开阔,多平缓塌地,并且有大面积梯田。流域内绝大部分土壤是黄绵土,还有少量二色土和红胶土^[13]。本研究所用 DEM 数据由大南沟流域 1:1 万大比例尺地形图数字化生成,DEM 为 519 行 580 列,分辨率为 5 m。为便于分析,将整个流域划分为 205 个 100 m×100 m 的取样地块,每个地块包含 400 个(20 行 20 列)格网单元,取各地块中心点对应单元的坡长值代表该块进行分析。

1.2 研究方法

1.2.1 坡长真实值提取方法 本研究在地形图上直接量算坡长值,以此作为坡长的真实值。具体过程是在 1:1 万地形图上确定流域范围和 205 个地块,量算每个 100 m×100 m 的地块中心点沿与等高线垂直方向到山脊线或山顶(水流起始点)的水平距离,此距离即是所求的坡长值。

1.2.2 非累计流量的直接计算法 坡长的定义为地面上一点沿水流方向到其流向起点的最大地面距离在水平面上的投影长度,结合水流起点和流向数据,沿流向追踪每个格网单元到起点的最大累计水流长度即是该格网到坡顶的坡长。在 ArcGIS 9.0 中编写 AML 程序进行提取(图 1)^[5,14]。

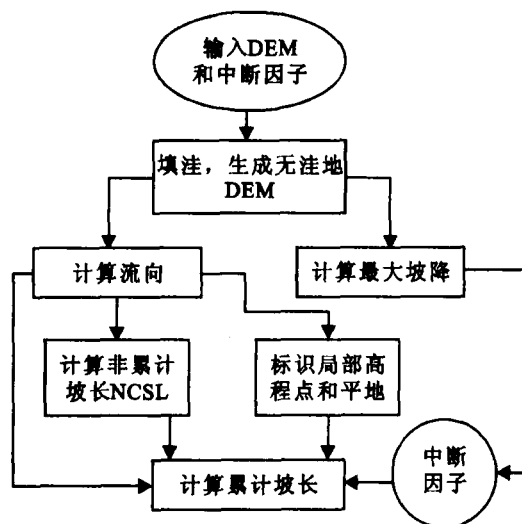


图 1 基于格网算法坡长提取流程图

(1) 填注处理。由等高线直接生成的 DEM 一般会存在一些高程值低于周围的凹陷点,因不能判别这些点的流向而造成流路中断。为消除其影响,把洼地的高程填平为其周围最低点的高程。

(2) 计算格网单元的流向。采用最大坡降算法,即单元格坡度的最佳代表值是以其为中心 3×3 窗口内其周围 8 个方向坡度最大值。水流方向与最大坡降一致^[6]。

(3) 标识局部高程点。局部高程点是指没有其它格网单元流入,或有其它单元流入,但与入流单元之间坡角为零的格网单元。对应于 DEM 中的山顶、山脊线上的点及位于 DEM 边缘的点,这些点通过水流方向矩阵识别。识别的条件是格网单元周边各相邻点的水流方向均不指向该单元。

(4) 计算每个格网单元的非累计坡长(NCSL),即计算该格网单元在流向方向上的长度。计算规则如下(g 为格网分辨率):

$$\text{NCSL} = \begin{cases} 1/2 g & (\text{出流为坐标轴方向的局部高程点}) \\ \sqrt{2}/2 g & (\text{出流为对角线方向的局部高程点}) \\ g & (\text{出流为坐标轴方向的非局部高程点}) \\ \sqrt{2} g & (\text{出流为对角线方向的非局部高程点}) \end{cases}$$

(5) 格网单元的累计坡长计算。依据格网单元流向,将流入当前格网单元的上游格网单元非累计坡长进行累加。如果当前格网单元的上游单元不只有一个,则取当前格网单元上游最大坡长值作为当前格网单元的上游累计坡长。

实际地形中,当坡度降低到一定程度时会发生由侵蚀到沉积的转变,在这里用中断因子(cutoff factor)来表现。中断因子定义为格网单元对应的坡度值与其上游流向方向的格网单元坡度比值的临界值,这一比值反映了当前格网坡度相对于上游格网坡度的减小程度,若当前格网与上游格网坡度比值小于中断因子(临界值),则水流到此产生沉积,坡面结束。可见中断因子越小,对坡度减小的程度要求越高。中断因子通常由熟悉研究区特征的专家确定,当无法得到研究区的中断因子相关研究结果时,也可以采用 Hickey 方法提供的默认值^[14],坡度大于 5% 的中断因子设为 50%,即当格网单元坡度小于其上游单元坡度的 50% 时,中止坡长累加,以中止点为起点重新开始累加计算。

对于坡度小于 5% 的情况,为了表现缓坡水流搬运能力较弱,坡度的微小降低就可能产生沉积出现,将中断因子设为 70%,即格网单元坡度小于其上游单元坡度的 70% 时即中止坡长累加。

1.2.3 快速计算方法 如果坡地满足坡面水流方向与山脊线垂直,则计算每个点沿垂直方向到山脊线的水平距离可以作为该点坡长的近似值。

在 ArcGIS 9.0 中计算过程如下^[10]:首先提取研究区的山脊线。由于山脊线基本对应于相应负地形的沟道,其提取过程可转化为提取负地形河网。通过栅格算术运算把实际地形转化为与之起伏相反的负地形,对负地形数据进行填洼等预处理,用水文分析

功能提取负地形的河网。为使河网能反映实际地形特征,把负地形累积流量图与实际地形光照晕渲图叠加,设定合适的二值化域值,直到河道与实际山脊地形基本吻合为止。提取出山脊线之后,再求取格网单元到最近邻山脊线的垂直距离作为近似坡长。

1.2.4 比较分析方法 在计算值与真实值的比较分析过程中,主要选取合格率、相关系数和确定性系数来分析两种方法的计算精度。合格率是模型预报中常用指数之一^[15]。本文首先统计计算值与实际值绝对误差小于 5 m 或相对误差小于 30% 的样区数,将此数值除以总样区数乘以 100% 作为合格率。相关系数是用来度量两个要素之间直线相关程度和方向的统计量,取值范围为 -1~1。确定性系数由 Nash 和 Sutcliffe^[16] 于 1970 年提出,其计算公式为:

$$M_r = 1 - \frac{\sum (Q_i - Q_c)^2}{\sum (Q_i - Q_m)^2}$$

式中: Q_i ——实际值; Q_m ——实际值的平均值, Q_c ——计算值。在许多情况下,模型确定性系数类似于相关系数平方(r^2),但确定性系数反映的是计算值与实测值 1:1 线的接近程度,其取值范围为 $-\infty \sim 1$ 。如果确定性系数为 1,表示计算结果与实测值非常接近;确定性系数为 0,表示计算值与实测值之差的平方和恰好等于实测值与其平均值的平方和,表明用实测值的平均值来进行坡长估算与计算值的效果一样;模型确定性系数为负则表示实测值的平均值比计算值能更好地进行坡长估算^[15-17]。

2 结果分析

2.1 精度分析

在自动提取的 205 个样区坡长值中,两种方法共识别出位于山脊上的样区 26 个,由于各自给山脊点坡长赋值规则不同(直接计算法按 NCSL 规则计算,快速计算法赋为 0 值),不宜参与同真实值的比较分析。另有 4 个样区位于沟底,无法确定其所属坡面,故也不再讨论坡长。最终参与比较分析的坡长值为 175 个。分析结果见表 1。

如表 1 所示,前者计算值与实际值的线性相关程度较好,后者则较差。前一种方法的计算值与实际值的接近程度优于后者,尽管误差还较大,但比平均值要精确很多。而后一种方法的计算值的估计效果不如平均值,精度不能满足要求。

由图 2 和图 3 可见,第一种方法的计算值与 1:1 线比较接近,而第二种方法的值则相当离散,与 1:1 线接近程度很低。

表 1 不同计算方法的合格率、相关系数和确定性系数比较

计算方法	样区总数	绝对误差 < 5m 或 相对误差 < 30%		相关系数	确定性系数
		样区数	合格率		
直接算法	175	152	86.9%	0.800	0.516
快速算法	175	122	69.7%	0.276	-0.150

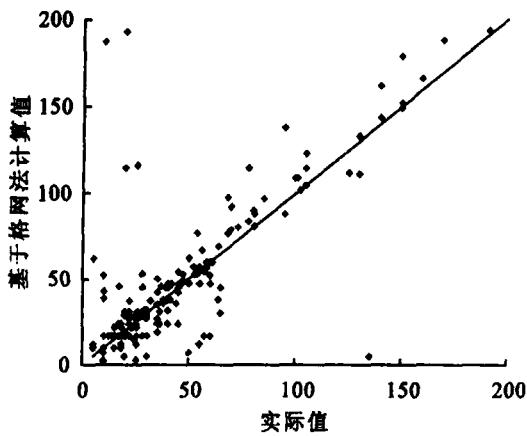


图 2 直接算法与实际值比较

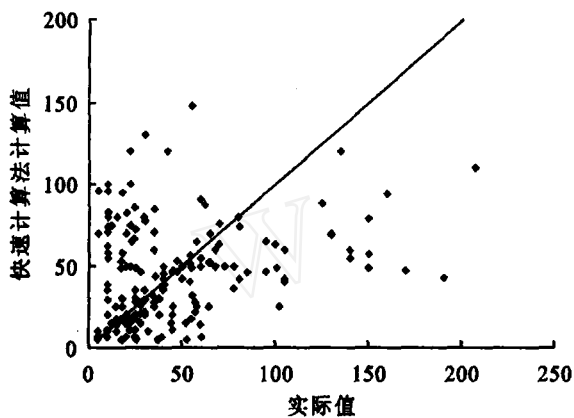


图 3 快速算法与实际值比较

2.2 计算误差原因分析

在 175 个参与比较分析的计算值中,造成直接计算方法偏高的原因如下:(1) 当山脊有一定宽度时,由于沿山脊走向可能存在坡降,算法会在沿山脊方向识别出水流路径,从而进行坡长的累加计算,造成山脊或临近山脊处出现较大坡长值的现象(图 4a)。

(2) 当研究区存在梯田之类的地形时,算法不能分辨出地形的阶梯特征,累加计算自梯田上端一直向下坡进行,造成计算值偏高。图 2 中左上方的偏大值主要表现了这两种情况,第 1 种原因造成的最大偏差达到 177 m,第 2 种则达到 173 m。

造成较低计算结果的原因有如下:(1) 识别出的局部高程点不是真正地形高点,可能在一个完整坡面上出现很多高点,这些高点各自作为累计水流长度计算的起点,破坏了坡面的完整性,使坡长计算值偏低(图 4b)。(2) 坡降超过默认中断因子值处并不对应实际地形中的坡降剧变,中止坡长累加会出现实际值很大而计算值偏小的情况。这两种原因产生的误差可从图 2 下方偏低点表现出来,因局部高程点识别错误和坡降误判造成的最大偏差分别是 43 m 和 130 m。

快速计算方法中把满足一定临界给水面积域值的负地形河道作为山脊线。因不同地貌类型对应的域值不同,当地貌类型复杂时,一个域值不可能适用于整个流域,而且直接用光照晕渲图拟合水系的主观性很大,也会影响提取精度。本研究中出现了很多山脊线判别错误(主要是判别不全),造成计算值偏高(图 4c),这种原因造成的最大偏差达到了 100 m。由于不考虑水流方向和沟谷的影响,在计算时又因流向和坡面判错而造成结果偏低(图 4d),坡面判错导致的最大偏差是 148 m。流向判错产生的误差表达式为:

$$m = L(1 - \cos\alpha)$$

式中: m ——绝对误差; L ——真实坡长; α ——等高线与山脊之间的夹角。距山脊线越远或等高线与山脊线夹角越大,造成的绝对误差也越大。

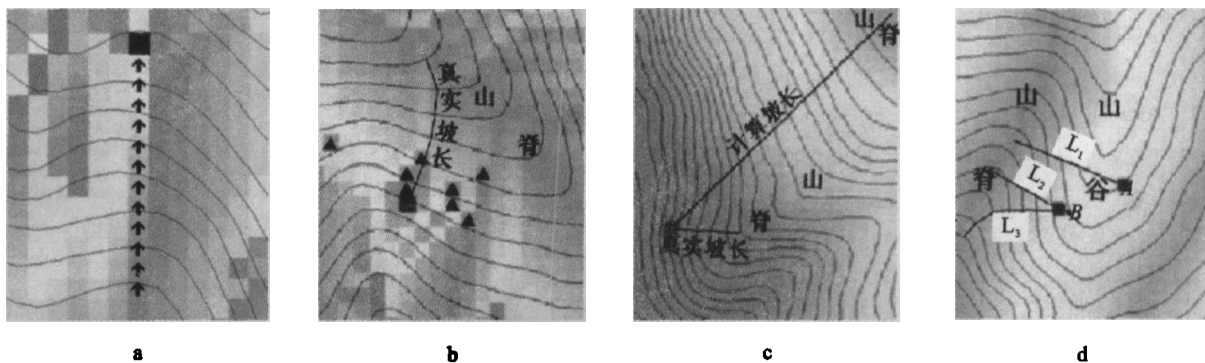


图 4 两种方法计算错误分析

图 4a 所示为直接计算方法出现的沿山脊线累加坡长(箭头所示)的错误;图 4b 中取样点处为完整坡面,因局部高程点(三角标识)识别过多而造成坡面破碎,坡长从错误的高点开始计算导致比真实值偏小;图 4c 中因取样点附近的山脊未被快速计算法识别,导致坡长从右上角山脊处累加而过长;图 4d 中点 A 不属于左侧山脊的坡面(有山谷相隔),但因其间间的距离较距实际山脊短,错将 L_1 作为其坡长计算。点 B 所示为流向判错产生的误差, L_2 为计算坡长, L_3 为考虑流向(与等高线垂直)的真实坡长。

3 结论

直接计算法的精度高于快速计算法。该方法物理意义明确,水文学和地貌学理论依据严密,计算结果符合分段坡定义,比较接近实际的地形特征。但方法中存在的问题影响了计算精度。主要是沿山脊线进行坡长累加,造成计算值过高,从而不能准确识别局部高程点,导致坡面破碎和提取值过低的问题。

经试验表明,对原始 DEM 数据进行平滑处理可以减轻局部高程点识别不准确问题,但同时也会改变实际的地形信息,在处理时要选择合适的方法,保证地形信息的真实性。中断因子的确定也是影响提取精度的一个因素,本文采用的是国外研究的推荐值,直接用于黄土高原这种地形特征复杂且坡度较陡的地区会产生误差,产生中止点的识别与实际地形不符的现象,(如在某些梯田地区不能识别中止点)。要使该方法能满足实际应用,还需进行改进。

快速计算法的精度较直接计算法低,但也有较大的改进空间。在研究中存在着大量实际存在的山脊没有被识别出来的问题,造成提取结果偏大,如果能找到一种准确的山脊线提取方法,将会大大减小因山脊线判别问题而造成的计算误差。且此方法借助常用 GIS 软件的空间分析功能即可实现,在进行较粗略的坡长估算时有重要意义。

[参 考 文 献]

- [1] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning [M]. Washington. D. C: Agriculture Handbook, No. 537. USDA, 1978.
- [2] Renard K G, Foster G, Weesies G A, et al. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[M]. Washington D. C. Agriculture Handbook, No. 703. USDA, 1997.
- [3] Laflen J M, Lwonaard J L, Foster G R. WEPP: a new generation of erosion prediction technology[J]. J. Soil and Water Cons, 1991, 46 (1) : 34—38.
- [4] Young R A, Onstand C A, Bosch D D, et al. AGNPS: A non-point source pollution model for evaluating agricultural watersheds[J]. J. Soil and Water Cons, 1989, 44 (2):168—173.
- [5] 周启鸣,刘学军. 数字地形分析[M]. 北京:科学出版社, 2006.
- [6] Hickey R A, Smith P Jankowski. Slope length calculations from a DEM within ARC/INFO GRID[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 1994,18(5): 365—380.
- [7] Jenson S K, Domingue J O. Extraction topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1988, 54 (11): 1593—1600.
- [8] 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.
- [9] Desmet P, Grovers G. GIS-based simulation of erosion and deposition patterns in an agricultural landscape: a comparison of model results with soil map information [J]. Catena, 1995,25:389—401.
- [10] Mitasova H. Surfaces and Modeling[J]. Grassclippings, 1993,7(1):18—19.
- [11] 张照录,崔继红. 基于栅格 GIS 土壤侵蚀地形因子的提取算法[J]. 计算机工程, 2006,32(5): 226—228.
- [12] 房世波,杨武年,张新时. 基于 GIS 的农业土壤侵蚀分级和退耕还林决策——以川西干旱河谷地区为例[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2005,20(1):72—77.
- [13] 许明祥,刘国彬,温仲明,等. 黄土丘陵区小流域土壤特性时空动态变化研究[J]. 水土保持通报, 2000,20 (1):21—23.
- [14] Remortel V, Hamilton R M, Hickey R A. Estimating the LS Factor for RUSLE through Iterative Slope Length Processing of Digital Elevation Data within ArcInfo Grid[J]. Cartography, 2001,30(1): 27—35.
- [15] 符素华,刘宝元,吴敬东,等. 北京地区坡面径流计算模型的比较研究[J]. 地理科学, 2002,22(5):604—609.
- [16] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models, part 1: a discussion of principles [J]. Journal of Hydrology, 1970, 10 (3) : 282—290.
- [17] Rise L M, Nearing M A, Zhang X C. Variability in Green-Ampt effective hydraulic conductivity under fallow conditions [J]. Journal of Hydrology, 1995, 169: 1—24.