

基于 DEM 的流域坡度坡长因子计算方法研究初报

杨勤科^{1,2}, 郭伟玲², 张宏鸣³, 王雷², 程琳³, 李俊³

(1. 西北大学 城市与资源学系, 陕西 西安 710069; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 流域尺度的坡度坡长(LS)因子计算是区域土壤侵蚀评价的重要基础。基于坡面水文学和土壤侵蚀学,对流域坡度坡长因子计算的基本原理、方法和工作流程进行了讨论。以黄土丘陵区的安塞县县南沟流域为例,对LS因子进行了实例计算,并对计算结果进行了初步分析,同时提出了目前亟待研究的问题。

关键词: DEM; 坡度坡长因子; 提取计算; 方法

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2010)02-0203-04

中图分类号: S157, TP79

Method of Extracting LS Factor at Watershed Scale Based on DEM

YANG Qin-ke^{1,2}, GUO Wei-ling², ZHANG Hong-ming³, WANG Lei², CHENG Lin³, LI Jun³

(1. Department of Urban and Resource Science, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China;
2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: It is essential for regional soil erosion survey and monitoring to calculate LS factor at the watershed and regional scales. Based on the theories of slope hydrology and soil erosion and the technologies of digital terrain analysis, the principles for slope and length factor are summarized and the methods and flow chart are suggested. By taking Xiannangou as an example, the LS themes are extracted and the characters are analyzed statistically and cartographically. The issues that should be studied urgently are discussed at last.

Keywords: DEM; slope and length factor; extracting and calculation; method

区域土壤侵蚀调查制图是土壤侵蚀治理宏观规划的基础,也是区域尺度土壤侵蚀研究的主要手段^[1]。由于区域土壤侵蚀模型尚在研究和开发阶段,因而通用土壤流失方程式(USLE)^[2]和修正通用土壤流失方程式(RUSLE)^[3]在大区域土壤侵蚀调查制图中得到了应用^[4-7]。在USLE和RUSLE中,地形对土壤流失的影响用坡度坡长因子(LS)表示^[3, 8]。USLE和RUSLE在流域和大区域的应用表明,计算流域内各点的LS,是USLE/RUSLE应用于流域和较大区域的关键问题^[9-12]。为此研究者针对流域和区域土壤侵蚀调查制图中的LS计算进行了一系列探索。Moore根据单位水流功率理论推导出了具有物理基础的LS计算方法^[9, 13-14];Wilson, Williams和Desmet专门讨论了流域LS计算方法^[11-12, 15-16]。Hickey和Van Remortel等研究了基于DEM提取区域LS的方法,并用ARC/INFO AML语言和C++语

言编写了相应程序^[17-20]。国内也对流域LS计算方法进行了专门研究^[21-23]。总的来说,对LS计算原理和关键技术的研究仍显薄弱,对计算结果的空间结构特征也缺乏必要的分析。本研究讨论了流域LS计算的理论基础和技术流程,结合研究实例对结果进行了初步分析,并提出了有待进一步研究的问题。

1 流域LS计算原理与方法

对于流域和区域LS的计算,是利用了坡面模型中的LS算法^[3],以适度分辨率的DEM为数据、以流域为单元,根据坡面水文学和土壤侵蚀学原理,通过分析地表径流和泥沙物质迁移过程,在GIS环境下利用数字地形分析的技术方法完成的。

1.1 流域LS计算原理

LS是坡度和坡长的函数,由于坡度算法比较成熟^[24],因而本研究重点分析坡长的提取原理。

收稿日期: 2009-05-12

修回日期: 2009-12-25

资助项目: 国家自然科学基金项目“用于区域土壤侵蚀评价的中低分辨率坡度变换方法研究”(40971173); 国家973计划项目(2007CB407203); 黄河水利委员会资助项目“水土流失经验模型指标体系及孤山川流域年产沙经验模型研究”[黄土高原水土流失数学模型(第一期)研发](黄水保200651-08)

作者简介: 杨勤科(1962—),男(汉族),陕西省陇县人,博士,教授,主要从事基于遥感和地理信息系统技术的区域水土流失评价研究。
E-mail: qkyang@nwu.edu.cn.

1.1.1 基本原理 坡面水文学^[25]和土壤侵蚀学研究表明^[26],降雨侵蚀过程中,径流携带泥沙从高处向低处流动,到达坡面下方注入沟槽,或在低洼部位被拦蓄。当坡度变缓、径流宽度增加、局地洼地、或者径流被残茬或植被拦截时,搬运能力将减少,坡面泥沙搬运过程结束。从径流发生点到泥沙汇集过程结束点之间的距离,就是流域土壤侵蚀评价中所应用的坡长(公式 1)。USLE 中将两类点定义为径流结束点,主要包括由于坡度降低出现沉积的部位和坡面漫流汇聚成沟道的部位^[8]。

$$\lambda_{x_i, y_i} = \int_{x_0, y_0}^{x_i, y_i} \lambda dx \quad (1)$$

式中: λ_{x_i, y_i} ——坐标点 (x_i, y_i) 处的坡长; 积分下限和上限 $(x_0, y_0$ 和 $x_i, y_i)$ ——分别为径流源点和终点; λ ——流路上每个栅格的坡长。

1.1.2 几个基本约定 虽然 Hickey 和 Van Remortel 没有明确论述,但是在他们的模型设计中,均有以下几个基本约定: (1) 自然地表是连续光滑的表面,一般情况下没有洼陷或孤立山峰。(2) 流水线方向上,下坡单元的坡度降低 50% 左右时,将出现沉积,因而成为上坡泥沙汇集过程流结束点和下坡泥沙汇集过程开始点^[10-11]。(3) 地表某点坡长等于该点上方径流汇集的长度,通过计算沉积发生前的上坡汇流长度,即可得到坡长。(4) 在基于 DEM 计算坡长时,规定相邻栅格之间径流的汇集,是从当前栅格的中心点到下坡方向紧相邻栅格的中心点。位于径流起点上的栅格,坡长取栅格长度或者对角线长度的 1/2。

根据上述原理和基本假定,流域 LS 计算的基本方法是:基于较高分辨率 DEM,根据水流来向和流向关系,定义局部高点作为坡长累计计算起点,从高到低,通过不断寻求径流结束点的方式,利用多重循环和迭代方法,完成对累计坡长的计算。利用 D8 算法提取坡度,并用陡坡 LS 因子公式计算流域 LS 专题层。

1.2 计算步骤

流域 LS 计算流程如图 1,主要步骤包括: (1) DEM 填洼。为了满足假定 1,消除 DEM 中存在的伪洼陷(sink),必须对洼地进行填充。(2) 计算坡度和各栅格坡长。坡度的计算可以采用多种方法,各种方法对于土壤侵蚀的影响上稍有不同^[27]。最关键的是,地面坡度均不能为 0,因而当坡度为 0 时候,设置为 0.1 度。这样可以使所有栅格均有 LS 值^[19]。(3) 栅格坡长。根据前面的假定 3,当径流沿 x 或 y 方向流动(东西方向或南北方向)时,栅格坡长定义为栅格

尺寸,当径流方向与 x 或 y 方向成 45° 交角(东北—西南、西北—东南)时,栅格坡长定义为 $\sqrt{2}$ 栅格尺寸。(4) 定义径流源点和终点。径流源点定义为无径流汇入的栅格单元,在径流源点上,初始栅格坡长定义为栅格坡长的 1/2。(5) 定义沉积部位。径流终点与发生沉积的部位相适应,据研究下坡方向平均坡度减少 50% 以上,会发生沉积。据此,最早由 Hickey 据有关研究^[10-11]引入了一个坡度截断因子(slope cutoff factor, SCF)来定义径流终点。SCF 用当前栅格到相邻下坡栅格(沿着径流线方向)坡度减少的相对数量来定义,一般用小数表示,如 50% 表示为 0.5^[17-18]。(6) 计算累计坡长。累计坡长定义为沿着流水线方向各栅格坡长的和。(7) 计算 LS 值。基于上述步骤中提取的坡度和坡长,利用陡坡 LS 算法(公式 2—3)^[28],可求得流域 LS 专题层。

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.036 & \theta < 5^\circ \\ 16.8 \sin \theta - 0.5 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.9 \sin \theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (2)$$

$$L = (\lambda / 22.1)^m, m = \begin{cases} 0.2 & \theta \leq 1^\circ \\ 0.3 & 1^\circ < \theta \leq 3^\circ \\ 0.4 & 3^\circ < \theta \leq 5^\circ \\ 0.5 & \theta \geq 5^\circ \end{cases} \quad (3)$$

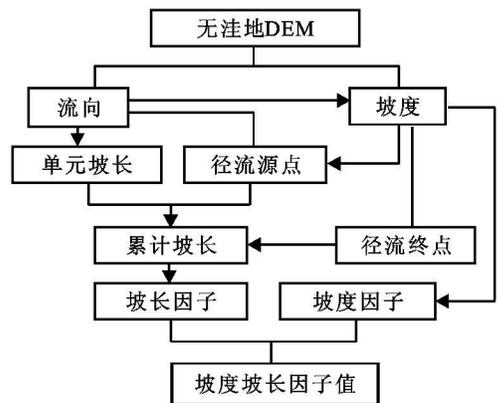


图 1 坡长因子(LS)计算流程

1.3 流域 LS 算法的实现

USLE 原本是一个坡面模型,LS 的计算只需现场量测到地块的坡度、坡长,便可根据 LS 算法比较容易的求得地块 LS 值^[2]。但是对于流域和区域尺度,实地量测是不现实的,只能基于中低分辨率的 DEM、通过编程来实现。本研究在 Van Remortel 代码的基础上,考虑了陡坡 LS 的算法,开发了流域 LS 计算工具(LS-Reg),可以方便地实现较大流域 LS 的自动计算。

2 计算示例

为了检验 LS 工具软件的效率, 并对流域 LS 提取的效果做出分析, 在黄土丘陵区安塞县的县南沟流域进行了实际计算, 并以此为基础进行初步分析。

2.1 研究区与数据基础

流域 LS 计算的工作区域(县南沟流域) 位于陕西省安塞县境内, 为黄河的 3 级支流, 流域面积约 44.85 km²。流域内地形属典型黄土丘陵沟壑, 地面坡度较大, 水土流失严重。LS 值提取的基础数据是分辨率为 2.5 m, 水文地貌关系正确的 DEM (hydrologically correct DEMs, H_e-DEM)。该数据是用 1:1 万数字地形图(包括等高线、高程点和河流; 等高距 5 m), 在 ANUDEM 软件支持下建立的。

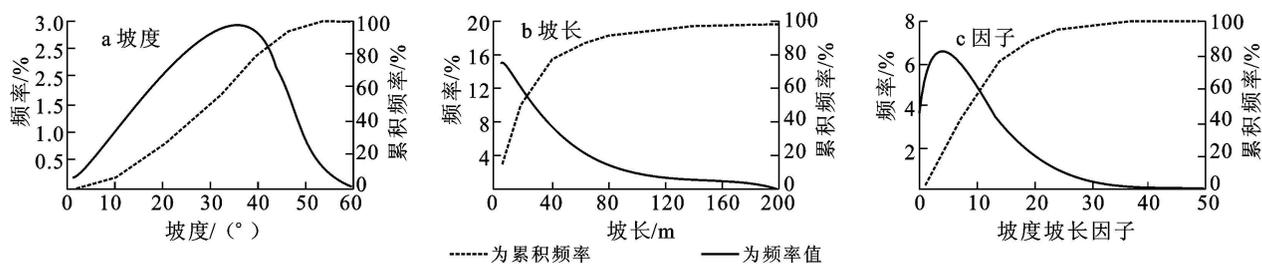


图 2 研究区坡度、坡长和 LS 频率分布

2.2.2 空间结构分析 从流域 LS 图(附图 4)和典型地区样图(图 3)可以看出, LS 的空间格局特征为:

(1) 梁峁顶部、滑塌地等地形平缓部位, 由于坡度比较小, 使 LS 值比较小; 而在沟壑等坡度较陡地段, LS 值较大; (2) 从坡形而言, 凹形坡部位 LS 值较大而凸

2.2 计算结果分析

2.2.1 统计分析 由计算结果可以看出(表 1, 图 2), 坡度、坡长和 LS 均值分别为 28.9°, 30.71 m 和 9.33; 这 3 个指标的中值分别为 29°, 18 m 和 8, 均与野外实测结果和有关研究结果接近。

表 1 县南沟流域 LS 特征值

特征值	坡度/(°)	坡长/m	LS
最小值	0.02	0	0
最大值	74.74	806.78	68.00
平均值	28.90	30.71	9.33
STD	11.92	36.85	7.12
中值	29.00	18.00	8.00

形坡和直形坡部位较小; (3) 从表面纹理特征看, LS 图形表现出空间上的连续性和不连续性同时存在的特征(图 3b), 其中连续性来自坡度(图 3d)且与地形特征相适应, 而不连续性则主要来自坡长(图 3c)并且与地形特征不相协调(图 3d)。

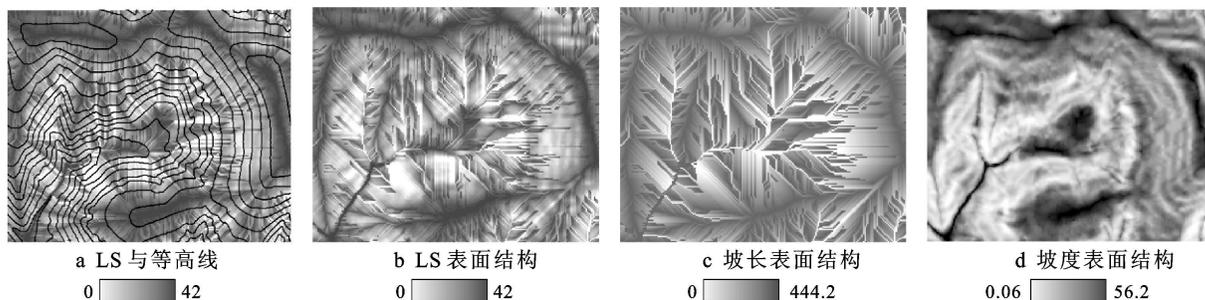


图 3 研究区 LS 值的结构

3 讨论

3.1 研究结论

(1) LS 计算是利用 USLE 等坡面模型进行流域与区域土壤侵蚀评价与制图的基础, 基于较高分辨率 DEM, 可以提取流域和区域尺度的 LS 专题层, 从而为区域土壤侵蚀评价提供数据支撑。

(2) 坡度水文学、流域土壤侵蚀学原理是区域

LS 计算的理论基础, 只有将这些学科的基本理论相交叉结合, 才能理解土壤侵蚀评价中地形因子, 特别是坡长的基本概念, 并计算出合理的 LS 值。

(3) 流域任一点位上的坡长值, 为流路上各点栅格坡长的累计值, 这反映了在一定程度上从坡面向区域的尺度转换。

3.2 问题与讨论

尽管所介绍的 LS 算法在实践中得到了应用, 具

有比较好的应用效果,但考虑到土壤侵蚀地形因子研究是一个基础性科学问题,且 LS 计算工具即将应用到全国土壤侵蚀普查,因而以下问题亟待进一步研究解决。

(1) 坡长的基本概念。应该从土壤侵蚀学和坡面水文学角度,对流域尺度上,应用于土壤侵蚀评价的流域分布式坡长做出科学而切合实际的界定;同时,对坡长的起点和终点做出论证,提出控制指标和阈值。

(2) LS 计算的精度评价和不确定性分析。通过野外实测坡度和坡长,对流域尺度 LS 计算结果做出评价,并分析其与 DEM 分辨率、流向算法等的关系,并分析其不确定性。

(3) 地区适用性和应用示范问题。在全国主要水蚀地区,选择典型试验研究样区,计算 LS 值,分析现有算法的地区适用性,以提取若干与区域地形特征相适应的控制指标。

致谢 水利部水土保持监测中心,北京师范大学地理学与遥感学院等提供支持;王春梅、古云鹤等参与数据处理;一并致谢。

[参 考 文 献]

- [1] 杨勤科,李锐,刘咏梅,区域土壤侵蚀普查方法的初步讨论[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(3): 1-7.
- [2] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: A Guide to conservation planning [M]. Washington D C: USDA Agric. Handb., 1978: 537.
- [3] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting rainfall erosion by Water: A Guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [M]. Washington D C: USDA Agric. Handb. 1997: 703.
- [4] Lu H, Prosser I P, Moran C J, et al. Predicting sheetwash and rill erosion over the Australian continent [J]. Australian Journal of Soil Research, 2003, 41: 1037-1062.
- [5] Yang D, Kanae S, Oki T, Koike T, et al. Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes [J]. Hydrological Processes, 2003, 17: 2913-2928.
- [6] 汪邦稳,杨勤科,刘志红,等. 陕北退耕前后的土壤侵蚀动态分布:以延河流域为例 [J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(4): 27-33.
- [7] 程琳,杨勤科,谢红霞,等. 基于 GIS 和 CSLE 的陕西省土壤侵蚀定量评价研究 [J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 61-66.
- [8] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: A

Guide for soil and water conservation planning [M]. Washington D C: USDA Agric. Handb., 1978: 537.

- [9] Moore I D, Wilson J P. Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1992, 47(5): 423-428.
- [10] Griffin M L, Beasley D B, Fletcher J J, et al. Estimating soil loss on topographically nonuniformed field and farm units [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1988, 43(4): 326-331.
- [11] Wilson J P. Estimating the topographic factor in the universal soil loss equation for watersheds [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1986, 41(3): 179-184.
- [12] Williams J R, Berndt H D. Determining the universal soil loss equation's length-slope factor for watersheds [M] // Foster G R. Soil Erosion: Prediction and Control. Iowa: Soil Conservation Society of American, 1997: 217-225.
- [13] Moore I D, Burch G J. Modelling Erosion and Deposition: Topographic Effects [J]. Transactions of the ASAE, 1986, 29(6): 1624-1630.
- [14] Moore I D, Burch G J. Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(5): 1294-1298.
- [15] 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(1/4): 389-401.
- [16] Desmet P J. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1996, 51(5): 427-433.
- [17] Hickey R, Smith A, Jankowski P. Slope length calculations from a DEM within ARC/INFO grid [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 1994, 18(5): 365-380.
- [18] Hickey R. Slope angle and slope length solutions for GIS [J]. Cartography, 2000, 29(1): 1-8.
- [19] Van Remortel R, Hamilton M, Hickey R. Estimating the LS factor for RUSLE through iterative slope length processing of digital elevation data [J]. Cartography, 2001, 30(1): 27-35.
- [20] van Remortel R D, Maichle R W, Hickey R J. Computing the LS factor for the Revised Universal Soil Loss Equation through array-based slope processing of digital elevation data using a C++ executable [J]. Computers & Geosciences, 2004, 30(9/10): 1043-1053.

[参 考 文 献]

- [1] 沈国防, 王礼先. 中国生态环境建设与水资源保护利用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [2] Hudson N H. Soil conservation [M]. London: Batsford, 1995.
- [3] 中国大百科全书水利卷编委会. 水土保持分支条目 [M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1992.
- [4] 唐克丽. 中国水土保持 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [5] 史德明. 长江流域水土流失与洪涝灾害的关系剖析 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(1): 1-7.
- [6] 师哲, 张亭. 鄱阳湖地区流域水土流失特点初探 [J]. 长江科学院院报, 2008, 6(3): 38-41.
- [7] 高学田, 唐克丽. 神府一东胜矿区一、二期工程中新的人为加速侵蚀 [J]. 水土保持研究, 1994, 1(4): 23-24.
- [8] 刘伟常. 保持水土, 利国利民: 深圳市水土流失现状及防治对策 [J]. 水土保持研究, 1997, 4(1): 2-6.
- [9] 张爱国, 张平仓, 杨勤科. 区域水土流失土壤因子研究 [M]. 北京: 地质出版社, 2003.
- [10] 李智广. 开发建设项目水土保持监测 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [11] 李智广. 水土流失测验与调查 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [12] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses a guide to conservation planning [M]. Washington, D C: Agriculture Handbook U S Department of Agriculture, 1978.
- [13] 蔡强国, 王贵平, 陈永宗. 黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [14] 陈文亮. 组合侧喷式野外人工模拟降雨装置 [J]. 水土保持通报, 1984, 4(5): 43-48.
- [15] 陈文亮, 唐文丽. SR 型野外人工降雨模拟装置 [J]. 水土保持研究, 2000, 7(4): 106-110.
- [16] 周佩华, 张学栋, 唐克丽. 黄土高原土壤与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀模拟实验大厅降雨装置 [J]. 水土保持通报, 2000, 20(4): 27-30.
- [17] 吴普特, 高建恩. 黄土高原水土保持新论: 基于降雨地表径流调控利用的水土保持学 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.
- [18] 长江水利委员会长江科学院. 中央级科学事业单位购置项目: 水土流失过程实验系统 [R]. 2006.
- [19] 长江水利委员会长江科学院. 可移动水土流失实验系统设备购置项目竣工验收材料汇编 [R]. 2008.

(上接第 206 页)

- [21] 吴东亮, 刘鹏举, 唐小明, 等. 基于 GIS 的栅格化坡面径流路径模拟与 LS 值计算 [J]. 北京林业大学学报, 2001, 23(5): 10-14.
- [22] 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.
- [23] 汪邦稳, 杨勤科, 刘志红, 等. 基于 DEM 和 ArcGIS 的修正通用土壤流失方程的地形因子值提取 [J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(2): 18-23.
- [24] 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. London: Taylor and Francis Group, 2007: 111-118.
- [25] 施成熙. 陆地水文学 [M]. 北京: 科学出版社, 1959: 78-81.
- [26] Ellison W D. Soil Erosion Studies: Part I [J]. Agricultural Engineering, 1947, 28: 145-146.
- [27] Srinivasan R, Engel B A. Effect of slope prediction method on slope and erosion estimates [J]. Trans ASAE, 2008, 7(6): 779-783.
- [28] 水利部水土保持监测中心. 第 4 次全国土壤侵蚀普查技术规程 [Z]. 2009.