

# 黄河粗泥沙集中来源区区域地形因子比较研究

高云飞<sup>1</sup>, 李智广<sup>2</sup>, 杨胜天<sup>1</sup>, 曹炜<sup>3</sup>

(1. 北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 北京 100875;

2. 水利部 水土保持监测中心, 北京 100055; 3. 黄河水土保持生态环境监测中心, 陕西 西安 710021)

**摘要:** 在黄河粗泥沙集中来源区的清水川流域, 以 1 : 10 000 比例尺地形图上的小流域为基本单元, 在 1 : 250 000 比例尺 DEM 上提取地表起伏度、高程变异系数和等高线密度等区域土壤侵蚀地形因子, 以 1 : 10 000 比例尺计算的地形因子为真值, 拟合各区域土壤侵蚀地形因子的计算方法。结果表明, 等高线密度是合适的区域土壤侵蚀地形因子计算指标。应用该方法在皇甫川下游进行检验, 模拟结果误差小于 10%, 效果良好, 可作为土壤侵蚀区域地形因子计算时指标选择的参考。

**关键词:** USLE; 地形因子; 粗泥沙集中来源区; 等高线密度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)01-0111-04

中图分类号: S157.3, TV143

## Comparative Study for Regional Terrain Factors in Coarse Sand Source Area of Loess Plateau

GAO Yun-fei<sup>1</sup>, LI Zhi-guang<sup>2</sup>, YANG Sheng-tian<sup>1</sup>, CAO Wei<sup>3</sup>

(1. College of Geography and Remote Sensing, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. The Monitoring Center of Soil and Water Conservation, MWR, Beijing 100053, China; 3. The Monitoring

Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment of Yellow River, Xi'an, Shaanxi 710021, China)

**Abstract:** By taking small watershed on the 1 : 10 000 scaled topographic map of Qingshuichuan basin in the coarse sand source area of the Loess Plateau as a basic cell, terrain factors for regional soil erosion, including surface relief, variance coefficient, and contour line density, are extracted from 1 : 250 000 scaled digital elevation model. The terrain factors calculated from the 1 : 10 000 scaled map are regarded as truth values to fit the calculation method of terrain factors for soil erosion in each region. Results showed that only the contour line density is an appropriate index of terrain factors for regional soil erosion. The method has been applied in the lower reaches of Huangpuhuan River, with the deviation less than 10%. Such a good simulation result indicates that the method can be used as a reference to index determination in the calculation of regional terrain factor for soil erosion.

**Keywords:** USLE; terrain factor; coarse sand source area; contour line density

土壤侵蚀地形因子(terrain factor)是对土壤侵蚀产生明显影响、可应用于土壤侵蚀定量评价的地形指标,是影响土壤侵蚀的重要因素之一。由于地表信息在不同尺度、不同比例尺上的反映量不同,即存在“尺度效应”,因此在不同尺度上反映地形对土壤侵蚀影响的主导因子有所差别。在坡面尺度,一般采用坡度、坡长等微观地形指标<sup>[1]</sup>计算地形因子,通常是使用 DEM(digital elevation model)数据提取坡度坡长,再应用经验公式进行计算<sup>[2-3]</sup>。DEM 数据的比例

尺越大,提取的坡度坡长越接近于实际,地形因子计算越准确。在区域尺度,地形因子的计算还不成熟,可归纳为 3 种方法:(1)根据地貌学、土壤侵蚀学原理拟定中小比例尺 DEM 数据能够反映的区域地形特征指标,进而计算地形因子,该方法尚处于定性分析探讨阶段;(2)利用全区域大比例尺 DEM 计算微观地形指标后扩展到区域尺度,大比例尺 DEM 因价格昂贵、覆盖不全等原因难以获取,且数据处理、计算工作量大;(3)以局部大比例尺 DEM 微观地形指标

收稿日期:2011-08-10

修回日期:2011-10-23

资助项目:中华人民共和国国务院第一次全国水利普查项目

作者简介:高云飞(1978—),男(汉族),吉林省东辽县人,博士研究生,主要从事遥感和水土保持研究。E-mail:gyfcsdn@mail.bnu.edu.cn。

通信作者:杨胜天(1965—),男(彝族),贵州省贵阳市人,博士,教授,主要从事水文水资源遥感、环境遥感和地理信息系统研究。E-mail:yangshengtian@bnu.edu.cn。

为真值,对中小比例尺 DEM 数据提取的微观地形指标进行尺度变换<sup>[2]</sup>。该方法算法复杂,对影响土壤侵蚀的其他因子数据要求较高。

本文以黄河粗泥沙集中来源区为研究区,利用 1:250 000 比例尺 DEM 提取地表起伏度、高程变异系数和等高线密度等区域土壤侵蚀地形指标,以 1:10 000 比例尺计算的地形因子为真值,评价各区域土壤侵蚀指标计算地形因子的结果,为区域土壤侵蚀地形因子计算的指标选取提供参考。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

研究区位于黄河中游粗泥沙集中来源区,包括皇甫川下游和清水川 2 个流域,总面积约 1 300 km<sup>2</sup>,涉及陕西府谷县、内蒙古自治区准格尔旗。地理坐标为 110°34'43"—111°11'50"E,39°8'34"—39°34'59"N,区内以谷(沟)缘线为界,其上为沟间地,其下为沟谷地。沟间地主要为梁、峁和坡,面积一般占流域总面积 65%左右,顶部地面坡度为 3°~5°,坡面坡度多数为 20°以下,局部可达 25°~30°。沟谷地又分为沟谷坡、沟谷底。谷(沟)缘线到坡脚线之间为沟谷坡,主要为陡坡和现代侵蚀沟,面积一般占流域总面积 30%左右,坡度一般为 30°以上;坡脚线以下为沟谷底,主要为沟床、台地、陡坎等,面积一般占流域总面积的 5%~10%,沟道两岸坡度一般在 50°以上。

### 1.2 基础数据

(1) 按 25%密度均匀分布的纸质 1:10 000 比例尺地形图,共 13 幅,其中清水川流域 8 幅,皇甫川流域下游 5 幅;(2) 全区 1:250 000 比例尺 DEM,共 2 幅。

## 2 研究方法

### 2.1 技术路线

以大比例尺地形图计算的地形因子为基础,对中小比例尺 DEM 提取的地形指标进行尺度转换,计算区域土壤侵蚀地形因子(图 1)。在 1:10 000 比例尺地形图上确定典型区,在典型区内,应用 1:10 000 比例尺地形图,计算提取坡度坡长因子,提取地表起伏度、高程变异系数、等高线密度等区域地形指标,通过回归分析建立 1:10 000 比例尺坡度坡长因子与各区域地形指标之间的拟合关系;应用 1:250 000 比例尺 DEM 提取各区域地形指标,通过回归分析分别建立各区域地形因子在不同比例尺之间的转换关系;确定由 1:250 000 比例尺 DEM 计算的各区域地形指标计算地形因子的方法;评价不同区域地形指标模拟地形因子的精度,确定最佳区域地形指标,进行精度检验。

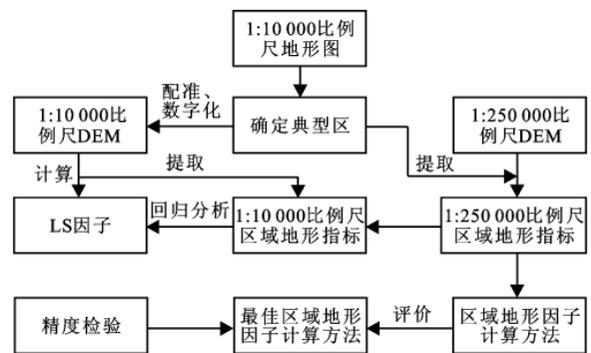


图 1 区域土壤侵蚀地形因子计算技术路线

### 2.2 数据预处理

为减少数字化工作量,保证地形具有代表性,在 1:10 000 地形图内选择典型区作为基本单元,进行各项预处理。具体步骤为:(1) 丘陵区和山区,在纸质 1:10 000 比例尺地形图上勾绘有代表性的面积为 0.2~3 km<sup>2</sup> 的闭合小流域,地势平坦区,勾绘 1 km×1 km 方格;(2) 扫描纸质 1:10 000 比例尺地形图,按四角地理坐标配准;(3) 数字化典型区范围内所有等高线,标注高程;(4) 应用 ArcGIS 中的 3D Analyst 模块,按高程将等高线转换成 TIN,再由 TIN 转换成 5 m 分辨率 DEM;(5) 采用中国土壤流失方程(Chinese soil loss equation, CSLE)<sup>[3]</sup> 中的方法计算坡度坡长因子,导出坡度坡长因子栅格属性表(包含栅格值和栅格数量信息),在 EXCEL 中统计基本单元坡度坡长因子的平均值  $\overline{LS}$ 。

### 2.3 区域地形因子计算

大量研究表明,由于尺度效应的存在,直接通过较低分辨率的 DEM 提取的坡度坡长值计算地形因子,只有数学意义而没有地貌学或者土壤侵蚀学意义。在研究区的清水川流域,以 1:10 000 比例尺地形图计算的  $\overline{LS}$  为基础,选取常用的区域土壤侵蚀地形指标等高线密度、地形起伏度、高程变异系数。

2.3.1 等高线密度  $\rho_c$  等高线密度是指单位面积内等高线的疏密程度,用等高线总长度占总面积比来表示,计算公式如下:

$$\rho_c = n_c / n \quad (1)$$

式中: $\rho_c$ ——等高线密度(%);  $n_c$ ——单位面积内等高线所占的栅格数(个);  $n$ ——单位面积内栅格总数(个)。

分别将 1:10 000 比例尺地形图和 1:250 000 比例尺 DEM 典型区内等高线由矢量转换成 5 m 分辨率栅格,统计等高线所占栅格数  $n_{c1}$ ,  $n_{c25}$  和栅格总数  $n$ ,按式(1)计算等高线密度  $\rho_{c1}$ ,  $\rho_{c25}$ 。计算结果见表 1。

表 1 不同比例尺下计算的典型区等高线密度相关指标统计

典型区编号	$\overline{LS}$	$n$	$n_{e1}$	$n_{e25}$	$\rho_{e1}$	$\rho_{e25}$
1	4.86	12 180	7 380	1 406	60.59	11.54
2	3.92	47 425	24 682	5 562	52.04	11.73
3	4.23	44 099	23 520	5 787	53.33	13.12
4	4.52	39 888	20 002	6 917	50.15	17.34
5	3.45	26 582	14 433	2 912	54.30	10.95
6	4.22	17 099	9 899	0	57.89	0.00
7	5.38	32 657	21 770	0	66.66	0.00
8	4.87	9 638	6 208	78	64.41	0.81

注:LS为坡面因子;  $n$ 为单位面积内栅格总数(个);  $n_{e1}, n_{e25}$ 分别为 1:10 000 和 1:250 000 比例尺 DEM 典型区域内的等高线所占栅格数;  $\rho_{e1}, \rho_{e25}$ 分别为 1:10 000 和 1:250 000 比例尺 DEM 典型区域内的等高线密度。

在 SPSS 软件中,以  $\overline{LS}$  为因变量,  $\rho_{e1}$  为自变量,采用回归分析中自动拟合的方法,拟合结果见式(2)。以  $\rho_{e1}$  为因变量,  $\rho_{e25}$  为自变量,拟合结果见式(3)。

$$\overline{LS} = 7.55 \rho_{e1} + 0.09 \quad (R^2 = 0.56) \quad (2)$$

$$\rho_{e1} = -0.72 \rho_{e25} + 0.63 \quad (R^2 = 0.67) \quad (3)$$

由式(2),(3)可知,在典型区内,1:250 000 比例尺下的地形因子平均值  $\overline{LS}_{25}$  与等高线密度  $\rho_{e25}$  之间的

拟合关系,见式(4):

$$\overline{LS}_{25} = -5.41 \rho_{e25} + 4.87 \quad (4)$$

2.3.2 地表起伏度 RF 地形起伏度是指在特定的分析区域内所有栅格中最大高程与最小高程的差值,它是坡度概念的延伸,在宏观的区域内反映了地面的起伏特征。按地表起伏度定义,分别应用 1:10 000, 1:250 000 比例尺 DEM 计算地表起伏度  $RF_1, RF_{25}$ , 结果如表 2 所示。

表 2 不同比例尺下计算的典型区地形起伏度相关指标统计

典型区编号	$H_{max1}$	$H_{min1}$	$RF_1$	$H_{max25}$	$H_{min25}$	$RF_{25}$
1	1 325	1 200	125	1 300	1 200	100
2	1 240	1 060	180	1 221	1 083	138
3	1 305	1 145	160	1 294	1 158	136
4	1 220	1 015	205	1 200	1 050	150
5	1 225	1 050	175	1 200	1 098	102
6	1 050	930	120	1 000	1 000	0
7	1 095	930	165	1 000	1 000	0
8	1 075	935	140	1 000	900	100

注:  $H_{max1}, H_{min1}, H_{max25}, H_{min25}$  分别为 1:10 000, 1:250 000 比例尺 DEM 典型区内的最大高程值和最小高程值。

以  $RF_1$  为因变量,  $RF_{25}$  为自变量,拟合结果见式(5)。以  $\overline{LS}$  为因变量,  $RF_1$  为自变量,拟合结果见式(6)。以  $\overline{LS}$  为因变量,  $\rho_{e1}$  和  $RF_1$  为自变量,采用二元回归分析的方法,拟合结果见式(7)。

$$RF_1 = 0.26 RF_{25} + 134.43 \quad (R^2 = 0.29) \quad (5)$$

$$\overline{LS} = 12.21 RF_1^{-0.20} \quad (R^2 = 0.07) \quad (6)$$

$$\overline{LS} = 9.10 \rho_{e1} + 0.60 RF_1 - 1.67 \quad (R^2 = 0.60) \quad (7)$$

2.3.3 高程变异系数  $V$  高程变异系数是反映分析区域内地表单元格网各顶点高程变化的指标,它以格网单元顶点的标准差  $s$  与平均高程  $z$  的比值来表示。按高程变异系数定义,分别应用 1:10 000, 1:250 000 比例尺 DEM 计算高程变异系数  $V_1, V_{25}$ , 结果如表 3 所示。

表 3 不同比例尺下计算的典型区高程变异系数相关指标统计

小流域编号	$z_1$	$s_1$	$V_1 (10^{-2})$	$z_{25}$	$s_{25}$	$V_{25} (10^{-2})$
1	1 260.58	28.15	2.23	1 251.12	23.90	1.91
2	1 170.29	35.39	3.02	1 167.60	31.73	2.72
3	1 248.40	33.29	2.67	1 238.98	23.38	1.89
4	1 137.36	44.36	3.90	1 136.98	33.32	2.93
5	1 166.17	35.18	3.02	1 172.18	32.53	2.78
6	1 005.05	28.84	2.87	1 000.00	0.00	0.00
7	1 005.93	43.51	4.33	1 000.00	0.00	0.00
8	1 025.91	32.13	3.13	999.26	3.42	0.34

注:  $z_1, s_1, z_{25}, s_{25}$  分别为 1:10 000, 1:250 000 比例尺 DEM 典型区内栅格高程值的标准差和平均高程。

以  $V_1$  为因变量,  $V_{25}$  为自变量, 其拟合结果见公式(8)。以  $\overline{LS}$  为因变量,  $V_1$  为自变量, 其拟合结果见公式(9)。

$$V_1 = 59.36 (V_{25})^2 - 1.77 V_{25} + 0.04 \quad (R^2 = 0.55) \quad (8)$$

$$\overline{LS} = 9.07 \times 10^3 (V_1)^2 - 5.68 \times 10^2 + 12.98 \quad (R^2 = 0.58) \quad (9)$$

### 3 结果分析

(1) 等高线密度。大比例尺的典型区内, 由式(2)可知, 基于  $\rho_{c1}$  计算  $\overline{LS}$ ,  $\overline{LS}$  随  $\rho_{c1}$  增大而增大。基于以下原理: 无论实际地形的复杂程度如何, 等高线密度越大, 坡度越陡, 等高线越稀疏, 坡度越缓; 由式(3)可知, 在  $\rho_{c1}$  与  $\rho_{c25}$  之间进行尺度转换时, 自变量  $\rho_{c25}$  的斜率为负值,  $\rho_{c1}$  随  $\rho_{c25}$  增大而减小。分析认为, 在小流域内, 地形较为平缓时,  $\rho_{c1}$  较小,  $\rho_{c25}$  基本能够表现地表起伏特征, 随着  $\rho_{c1}$  增大, 地表坡度趋陡, 由于尺度效应的存在, 中小比例尺 DEM 已不能表现地表细节特征, 在使用平均高程表示地表起伏的同时, 削弱了最大高程与最小高程, 导致  $\rho_{c25}$  减小。

在皇甫川流域下游, 应用式(4)计算  $\overline{LS}_{25}$ , 结果如表 4 所示。

表 4 皇甫川流域下游地形因子指标计算结果及误差统计

典型区编号	$\overline{LS}$	$\overline{LS}_{25}$	误差/%
9	4.38	4.40	0.45
10	4.57	4.50	1.52
11	4.62	4.58	1.19
12	0.49	4.87	894.15
13	4.72	4.40	6.89

除编号 12 的小流域外, 模拟值  $\overline{LS}_{25}$  与  $\overline{LS}$  误差均小于 10%, 说明式(4)模拟效果良好。在实际地貌中, 当  $\rho_{c25}$  接近或等于 0 时, 存在  $\rho_{c1}$  趋近最大值和最小值两种情况。典型区为丘陵山地,  $\rho_{c1}$  趋近最大值, 如编号 6, 7, 8 的小流域; 典型区为平原,  $\rho_{c1}$  趋近最小值, 如编号 12 的典型区为 1 km×1 km 方格, 这也是造成精度检验中误差很大的原因。因此, 在地势平坦区, 不适合使用本文所拟合的尺度转换方法。

(2) 地表起伏度。由式(5)与式(6)的判定系数可知, 应用地表起伏度计算区域土壤侵蚀地形因子的效果并不理想。由式(7)的判定系数可知, 在增加了自变量 RF 后, 拟合效果略好于仅使用自变量  $\rho_c$  的情

况, 但  $\rho_c$  与 RF 的偏回归系数 t 值分别为 2.595, 0.762, 说明 RF 在小流域范围内不具备良好的预测效果。分析认为, 在小流域范围内, RF 仅表示最大高程与最小高程的差值, 不能反映各栅格高程值的分布规律。RF 值相同的小流域,  $\overline{LS}$  具有不确定性, 如陡坡较多, 则  $\overline{LS}$  模拟值偏小, 缓坡较多, 则  $\overline{LS}$  模拟值偏大。

(3) 高程变异系数。由式(8), (9)的判定系数可知, 应用  $V$  进行区域地形因子计算的拟合效果略低于  $\rho_c$ 。分析认为, 在小流域范围内, 需谨慎使用高程变异系数作为区域土壤侵蚀地形因子计算的指标。在  $V$  值较大的小流域, 在  $z, s$  相同的情况下,  $\overline{LS}$  具有不确定性, 如各栅格高程值集中分布在最大高程和最小高程附近时, 则  $\overline{LS}$  模拟值偏大。

### 4 结论

(1) 在丘陵山地, 使用 1 : 250 000 比例尺 DEM 提取等高线密度  $\rho_c$ , 进行区域土壤侵蚀地形因子计算, 与 1 : 10 000 比例尺 DEM 计算的  $\overline{LS}$  对比, 误差小于 10%, 效果良好, 可作为土壤侵蚀区域地形因子计算时指标选择的参考。

(2) 地形起伏度 RF 仅表示最大高程与最小高程的差值, 不能反映各栅格高程值的分布规律。RF 值相同的小流域,  $\overline{LS}$  具有不确定性, 如陡坡较多, 则  $\overline{LS}$  模拟值偏小, 缓坡较多, 则  $\overline{LS}$  模拟值偏大。

(3) 需谨慎使用高程变异系数  $V$  作为区域土壤侵蚀地形因子计算的指标。在  $z, s$  相同, 且  $V$  值较大的小流域,  $\overline{LS}$  具有不确定性, 如各栅格高程值集中分布在最大高程和最小高程附近时, 则  $\overline{LS}$  模拟值偏大。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Meyer L D. Evolution of the universal soil loss equation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1984, 39 (2):99-104.
- [2] Yang Q K, Jupp D, Li R, et al. Re-scaling lower resolution slope by histogram matching[C]//Zhou Q, Lees B G, Tang G A. Advances in Digital Terrain Analysis (Lecture Notes in Geoinformation and Cartograph). 2008:193-210.
- [3] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. Transaction of American Society of Agriculture Engineers, 1994, 37 (6):1835-1840.