

基于四种分辨率 DEM 的侵蚀模型地形因子差异分析*

郭春香^{1,2} 梁音^{1†} 曹龙熹¹

(1 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 通过提取江西省兴国县湫水河流域 10 m、25 m、50 m 和 100 m 四种分辨率数字高程模型 (DEM, Digital Elevation Model) 的坡度、坡长因子, 在 GIS 数字地形分析和数理分析等方法支持下, 研究不同分辨率 DEM 计算坡度坡长组合因子 (LS) 的精度差异。结果表明: (1) 基于 4 种分辨率 DEM 提取的坡度结果存在明显差异, 随分辨率的降低, 坡度整体变缓, DEM 精度越低, 对地形的概括作用越大, 100 m 分辨率 DEM 平均坡度降为 10m 分辨率 DEM 平均坡度的 45.04%。(2) 流域坡长以 0~80 m 的短坡为主, 随着分辨率的降低, 地面坡长明显整体延伸。(3) 不同分辨率 DEM 计算的 LS 因子平均值变化范围为 6.10~7.10, 坡度和坡长的组合消弱了单一坡度和坡长的影响, 随着地形起伏程度增大, 在 LS 因子计算过程中, 坡度的主导作用越来越弱, 坡长的主导作用越来越强。

关键词 DEM; 地形分析; 地形因子; 坡度; 坡长

中图分类号 S157 **文献标识码** A

数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 是进行流域特征分析、地形地貌模拟、土壤侵蚀预报的基础数据, 基于 DEM 计算流域尺度的坡度、坡长等地形因子, 是运用侵蚀模型进行流域水土流失估算的重要前提。不同比例尺的 DEM 数据栅格分辨率不同, 在流域地形信息载量与精度上均存在着明显的差异。目前, 针对地形信息随着 DEM 分辨率是如何变化的问题, 众多学者展开了研究。汤国安等^[1]和陈楠等^[2]对 1:1 万和 1:5 万比例尺的 DEM 信息容量进行了比较, 得出在黄土高原沟壑地区不同比例尺 DEM 所提取的地面坡度、坡向、地面曲率、沟壑量等地形因子均存在较大的误差; Zhang 和 Montgomery^[3]研究表明 DEM 栅格分辨率对从其上提取的地形指数的精度有显著的影响; 刘红艳等^[4]、Gao^[5]和 Thompson 等^[6]从不同角度分析了地面误差的成因及误差随 DEM 分辨率变化而变化的规律。董莉和赖元长^[7]、田国珍等^[8]研究表明, 大比例尺 DEM 描述精度、地形信息载量等均优于小比例尺; 陈燕等^[9]构建了一个比较适用于黄土高原不

同地貌类型的坡度转换图谱; 王璇等^[10]建立了坡度面积百分比平均误差与分辨率的对应关系; 郭伟玲等^[11]利用直方图匹配原理对 50m 分辨率 DEM 上提取的坡度、坡长进行变换。以往研究对于深刻理解 DEM 分辨率对地形因子提取精度的影响机制具有重要意义, 然而这些研究大多针对单个地形因子的变化规律, 而在土壤侵蚀模型中, 地形因子是以坡度和坡长组合的形式出现, 目前对坡度坡长组合因子 (LS) 随 DEM 精度的变化研究较少; 另一方面, 当前研究大都是两种分辨率 DEM 的比较, 没有形成较多的 DEM 分辨率序列, 不能系统地分析地形因子随 DEM 精度的变化趋势, 同时, 不同分辨率 DEM 提取地形因子转换关系模型尚不统一。

本文选择南方红壤区的典型流域, 采用我国水土流失宏观监测中所用到的 10 m、25 m、50 m 和 100 m 分辨率的 DEM 数据, 提取流域尺度的坡度与坡长, 分析不同分辨率 DEM 对地形地貌的刻画程度, 探讨地形 LS 因子对 DEM 分辨率的响应机制, 建立不同分辨率 DEM 提取地形因子之间的转换关系,

* 国家科技支撑计划项目 (2011BAD31B04-2)、水利部长江委重点项目 (花岗岩地区马尾松林地水土流失规律试验研究)、中国科学院战略性先导科技专项 (122011151432016) 资助

† 通讯作者, E-mail: yiliang@issas.ac.cn

作者简介: 郭春香 (1988—), 女, 河南漯河人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: guoxiang0103@126.com

收稿日期: 2013-04-23; 收到修改稿日期: 2013-12-20

从而补充扩展已有的研究成果,同时亦为科学准确地运用模型进行土壤侵蚀预报提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江西省赣州市兴国县潯水河流域,地理坐标 115°30' ~ 115°52' E 和 26°19' ~ 26°37' N 之间,面积 579.2 km²,平均海拔 400 m,地面起伏高度小于 1000 m,属于典型的南方红壤低山丘陵区。已有研究表明,在中国低山丘陵区,基于 1:25 万地形图的 100 m 分辨率 DEM 更适合作为数据源来提取基本地貌类型,其对应的最佳采样格网单元为 2.1km × 2.1km(4.41km²)^[12],选用流域基于 1:25 万地形图的 100 m 分辨率 DEM 数据提取地势起伏高度,结合宏观地貌类型分类标准^[13],进一步将地貌分为丘陵(起伏度 < 200 m)、低山(200 ~ 500 m)和中山(500 ~ 1000 m)三个地貌类型区(图 1),其中,低山区面积最大,占流域总面积的 59.97%,丘陵区 and 中山区分别占流域总面积的 36.55% 和 3.47%。

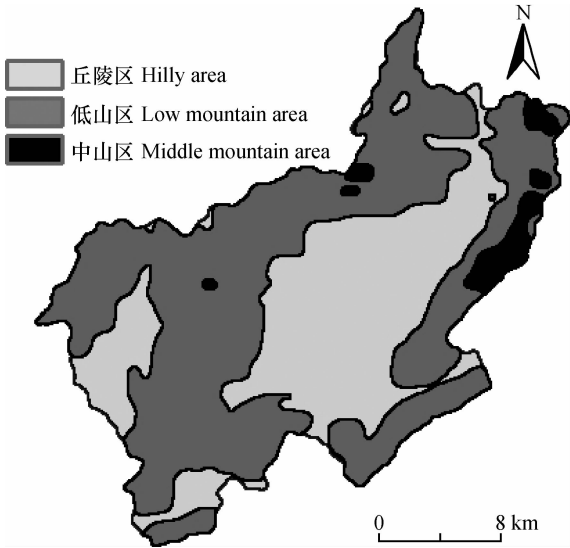


图 1 潯水河流域地貌类型分布图

Fig. 1 Distribution map of geomorphological types in the Lianshui River Basin

1.2 地形因子提取方法

在 ArcGIS9.3 支持下,矢量化流域 1:1 万、1:5 万、1:10 万和 1:25 万 4 种比例尺的地形图,构造地形结构线,建立空间拓扑关系与投影系统,建立 TIN 文件,空间内插 TIN 得到不同分辨率的 DEM 数据。

为保证统计结果具有可比性,不同比例尺地形图处理及制作 DEM 的方法流程完全相同,采用相邻两条等高线之间的水平距离作为栅格分辨率,最终形成四种分辨率分别为 10 m(基准 DEM)、25 m、50 m 和 100 m 的 DEM。然后根据 McCool 等^[14]和 Van Remortel 等^[15]提出的方法,编写 AML 语言直接提取 4 种分辨率 DEM 的坡度、坡长和 LS 因子信息专题图,并根据不同的地貌单元做叠加处理,提取各地貌单元的相应信息。LS 因子计算公式如下:

$$LS = L \cdot S \tag{1}$$

$$L = (\lambda/72.6)^m \tag{2}$$

$$S = \begin{cases} 10.8\sin\theta + 0.03 & \theta < 5.14^\circ \\ 16.8\sin\theta - 0.5 & \theta \geq 5.14^\circ \end{cases} \tag{3}$$

$$m = \beta/(1 + \beta) \tag{4}$$

$$\beta = (\sin\theta/0.0896)/[3.0(\sin\theta)^{0.8} + 0.56] \tag{5}$$

式中, L 为坡长因子; S 为坡度因子; λ 为由 DEM 提取的坡长(m); m 为坡长因子指数; θ 为 DEM 提取的坡度值($^\circ$); β 为细沟侵蚀和细沟间侵蚀的比率。

1.3 数据处理

ArcGIS、Origin 为本研究的主要软件平台,ArcGIS 的叠加比较和 Origin 的拟合回归分析为本研究的基本方法,通过分析叠加结果差异及拟合回归方程的决定系数得到研究结果。

2 结果与讨论

2.1 基于四种分辨率 DEM 的坡度差异性

地面坡度影响降雨空间再分配和地表水流流向,是与地表形态密不可分的一个地形因子。按照 SL190-2007《土壤侵蚀分类分级标准》中地面坡度分级标准,将坡度分为 0° ~ 5°、5° ~ 8°、8° ~ 15°、15° ~ 25°、25° ~ 35°、> 35° 共 6 个等级,从整个地面坡度分级统计结果(表 1)可以看出,4 种分辨率 DEM 提取的地形坡度分布存在明显差异,各坡度等级所占总面积比例最大值分别出现在 25° ~ 35°、15° ~ 25°、8° ~ 15° 和 0 ~ 5° 的坡度等级范围内,同时,0 ~ 15° 坡度范围内各级损失量均为正,而 > 25° 起,损失量均为负值,且随着分辨率的降低,损失量逐渐增大;将 10 m 分辨率作为基准 DEM,假设其提取结果为真实值,随着分辨率的降低,平均坡度逐渐减小,25 m 分辨率坡度均值降低为 10m 分辨率坡度均值的 77.67%,50 m 分辨率坡度均值降低为 61.76%,100 m 分辨率坡度均值降低为 45.04%,说

明小比例尺地形图中原始等高线间距的增大和弯曲的简化,使总体地形趋向平坦化,一些细部形态被综合,描述误差越来越大,地面坡度整体逐渐向

较低一级转化,DEM也从反映微观形态向宏观形态转化,精度越低对地形的概括作用越大。

表 1 基于四种分辨率 DEM 的不同坡度面积比例及损失量统计

Table 1 Statistics of slope gradients obtained by DEMs different in resolution and their respective information loss rates

| 分辨率 Resolution(m) | 0° ~ 5° | | 5° ~ 8° | | 8° ~ 15° | | 15° ~ 25° | |
|----------------------|-------------------|------------------|---------|------|----------|-------|-----------|-------|
| | 面积比例 ^① | 损失量 ^② | 面积比例 | 损失量 | 面积比例 | 损失量 | 面积比例 | 损失量 |
| 10(A) | 14.67 | | 4.90 | | 12.48 | | 26.02 | |
| 25(B) | 15.00 | 0.33 | 7.23 | 2.32 | 23.23 | 10.74 | 34.77 | 8.75 |
| 50(C) | 22.61 | 7.94 | 10.17 | 5.27 | 27.28 | 14.79 | 29.26 | 3.24 |
| 100(D) | 34.61 | 19.94 | 10.84 | 5.94 | 29.46 | 16.98 | 22.93 | -3.08 |

| 分辨率 Resolution(m) | 25° ~ 35° | | > 35° | | 平均坡度 Mean slope gradient (°) | |
|----------------------|-----------|--------|-------|--------|---------------------------------|--------|
| | 面积比例 | 损失量 | 面积比例 | 损失量 | 面积比例 | 损失量 |
| 10(A) | 28.99 | | 12.94 | | 21.04 | |
| 25(B) | 16.65 | -12.33 | 3.13 | -9.81 | 16.34 | -4.70 |
| 50(C) | 9.78 | -19.21 | 0.90 | -12.04 | 13.00 | -8.04 |
| 100(D) | 2.08 | -26.91 | 0.06 | -12.87 | 9.48 | -11.56 |

①Area percentage (%), ②Loss(%). 1)将 10 m 分辨率作为基准 DEM(A),其他三种分辨率与其的差值 Loss rate(B-A), Loss rate(C-A) and Loss rate(D-A), respectively. 下同 The same below

选取 100 m 分辨率 DEM 栅格中心点为试验样点,共 57 667 个,基于 10 m、25 m、50 m 和 100 m 等 4 种分辨率的 DEM,提取样点的坡度值,对 10m 分辨率的坡度值(y)与 25 m(x_1)、50 m(x_2)和 100 m(x_3)分辨率对应坡度值分别进行直线回归拟合,回归方程为:

$$y = 7.538 + 0.826 x_1, R^2 = 0.426; \quad (6)$$

$$y = 11.025 + 0.772 x_2, R^2 = 0.313; \quad (7)$$

$$y = 13.335 + 0.815 x_3, R^2 = 0.248; \quad (8)$$

方程的意义在于,通过确立不同分辨率 DEM 的坡度转换关系,可以使低精度 DEM 的坡度值通过一定的数学方程拟合和转化达到相应的高精度水平,从而减少坡度误差在实际研究中的影响。

2.2 基于四种分辨率 DEM 的坡长差异性

坡长影响坡面径流的流速、流量及水流挟沙力,在土壤侵蚀过程中起着重要的作用。结合坡长分布特征,按照 100 m 的等间距分类法,将坡长分为 0 ~ 80 m、80 ~ 150 m、150 ~ 250 m、250 ~ 350 m、350 ~ 450 m、>450 m 共 6 个等级,4 种分辨率 DEM 求算的整个地面坡长分级面积占总面积的百分比及损失量差异(表 2)均显示,随着分辨率的降低,<80 m 坡长的面积逐渐减小,而 80 m 以上的各级

坡长面积出现不同程度的增加,假设 10 m 分辨率 DEM 提取的坡长为真实值,其他 3 种分辨率提取坡长为 0 ~ 80 m 的短坡面积比例损失量最大,且为负值,其余损失量均为正值,尤其在 > 150 m 的长坡区域,分辨率越低,面积增量越大,同时 25 m 分辨率 DEM 提取的平均坡长为真实值的 2.12 倍,50 m 分辨率为真实值的 2.98 倍,100 m 分辨率为真实值的 5.54 倍。说明该区域坡长以 0 ~ 80 m 的短坡为主,且随着分辨率的降低,较短坡长被合并,坡长整体延伸,且由于实际地形分布及计算误差的存在,不同分辨率对应显著增加的坡长等级各不同。

选取分辨率为 100 m 的 DEM 栅格中心点为样点,基于研究区基准 DEM(10 m)与 25 m、50 m 和 100 m 等三种分辨率 DEM,选取 57 667 个试验样点进行散点图(图 2)分析,10 m 分辨率 DEM 提取的坡长主要集中在 200 m 以下,随着分辨率的降低,样点在 >400 m 区域分布逐渐增加,100 m 分辨率最为密集;同时,因 DEM 提取的坡长值与栅格尺寸有关,分辨率越低,栅格越大,坡长取值越单调,尤其 10 m 分辨率 DEM 的坡长可取值不断变化,而 100 m 分辨率坡长在 200 m 以下只有几个可取值,提取精度明显降低,整体分布呈现出几条横线,不能建立坡长之间精确的直线转换关系。可见,随着分辨率的变

化,坡长和坡度的变化趋势不同,两者共同作用于流域内的水土流失。

表 2 基于四种分辨率的不同坡长分级面积比例及损失量统计

Table 2 Statistics of slope length grades obtained by DEMs different in resolution and their respective information loss rates

| 分辨率 Resolution (m) | 0 ~ 80m | | 80 ~ 150m | | 150 ~ 250m | | 250 ~ 350m | |
|-----------------------|---------|--------|-----------|-------|------------|-------|------------|------|
| | 面积比例 | 损失量 | 面积比例 | 损失量 | 面积比例 | 损失量 | 面积比例 | 损失量 |
| 10 (A) | 91.89 | | 6.14 | | 1.58 | | 0.27 | |
| 25 (B) | 72.71 | -19.18 | 16.69 | 10.55 | 6.92 | 5.34 | 2.1 | 1.81 |
| 50 (C) | 65.09 | -26.8 | 15.8 | 9.66 | 11.72 | 10.13 | 3.89 | 3.61 |
| 100 (D) | 44.58 | -47.31 | 21.67 | 15.52 | 14.34 | 12.76 | 4.33 | 4.05 |

| 分辨率 Resolution (m) | 350 ~ 450m | | > 450m | | 平均坡长 Mean slope length (m) | |
|-----------------------|------------|------|--------|------|-------------------------------|--------|
| | 面积比例 | 损失量 | 面积比例 | 损失量 | 面积比例 | 损失量 |
| 10 (A) | 0.1 | | 0.01 | | 31.52 | |
| 25 (B) | 1.04 | 0.95 | 0.54 | 0.54 | 66.82 | 35.30 |
| 50 (C) | 1.71 | 1.6 | 1.81 | 1.8 | 94.06 | 62.54 |
| 100 (D) | 6.17 | 6.08 | 8.9 | 8.89 | 174.59 | 143.07 |

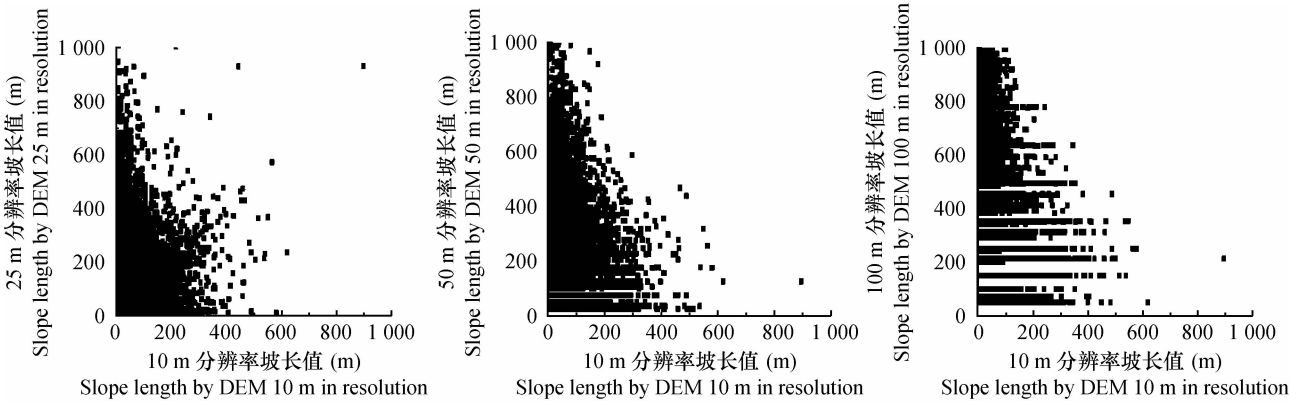


图 2 不同分辨率 DEM 与 10 m 地形坡长散点图

Fig. 2 Scatter diagram of slope lengths obtained by DEMs different in resolution

2.3 基于四种分辨率 DEM 的 LS 因子差异性

通过 L 因子和 S 因子相乘得到的 LS 因子,通常被作为一个独立的地形因子,用以表征土壤侵蚀中的地形效应。结合 LS 因子分布特征,取 5 为分级间距,将 LS 因子分为 0 ~ 5、5 ~ 10、10 ~ 15、15 ~ 25、> 25 共 5 个等级,表 3 表明,不同分辨率 DEM 计算的 LS 因子平均值变化范围为 6.10 ~ 7.10,且随着分辨率的降低,0 ~ 5 范围的 LS 因子面积比例先减小后增大,5 ~ 15 范围逐渐减小,> 15 范围逐渐增大,但变化范围差别不大,均能反映整体情况。假设 10 m 分辨率 DEM 提取的 LS 因子值为真实值,从 25 m 至 100 m,LS 因子平均值逐渐减小,但均略大于真实值。这主要是因为,DEM 分辨率同时影响坡度和坡长因子,随着分辨率的降低,坡度衰减变缓,坡长延

伸变长,LS 因子消弱了单一坡度坡长的影响。

2.4 不同地貌单元的 LS 因子差异性及其机理

按照丘陵区、低山区和中山区分别对不同分辨率 LS 因子分级结果进行分类比较,由表 4 可知,从丘陵区至低山区、中山区,LS 因子在 0 ~ 5 等级内的面积占总面积百分比逐渐减小,其余各等级均逐渐增大。对于不同的地貌单元,丘陵区 LS 因子主要集中于 0 ~ 5 等级内,且随着分辨率的降低逐渐增大,低山区在 0 ~ 5 和 5 ~ 10 两个等级分布最广,各等级面积比例随分辨率的降低变化不确定;中山区 10 m 分辨率 LS 因子在 0 ~ 5 等级内面积比例为 30.16%,明显高于其他三种分辨率,15 ~ 25 和 > 25 两个等级的面积比例随分辨率的降低逐渐增大。同时,随着分辨率的降低,LS 因子平均值在丘陵区

逐渐减小,在低山区和中山区逐渐增大,且中山区 增加幅度较大。

表 3 基于四种分辨率 DEM 的 LS 因子分级面积比例及损失量统计

Table 3 Statistics of LS factor grades obtained by DEMs different in resolution and their respective information loss rates

| 分辨率 Resolution(m) | 0~5 | | 5~10 | | 10~15 | | 15~25 | |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| | 面积比例 | 损失量 | 面积比例 | 损失量 | 面积比例 | 损失量 | 面积比例 | 损失量 |
| 10(A) | 52.28 | | 27.16 | | 13.40 | | 6.37 | |
| 25(B) | 47.56 | -4.72 | 26.89 | -0.27 | 13.51 | 0.11 | 9.76 | 3.39 |
| 50(C) | 48.57 | -3.71 | 26.06 | -1.10 | 12.48 | -0.92 | 10.17 | 3.80 |
| 100(D) | 53.22 | 0.94 | 19.91 | -7.25 | 12.08 | -1.32 | 11.50 | 5.13 |

| 分辨率 Resolution(m) | >25 | | 平均 LS 因子 Mean LS factor | |
|----------------------|------|------|----------------------------|------|
| | 面积比例 | 损失量 | 面积比例 | 损失量 |
| 10(A) | 0.79 | | 6.10 | |
| 25(B) | 2.28 | 1.49 | 7.10 | 1.00 |
| 50(C) | 2.72 | 1.93 | 6.92 | 0.82 |
| 100(D) | 3.29 | 2.50 | 6.73 | 0.63 |

表 4 不同地貌单元对应 4 种分辨率 DEM 提取的 LS 因子分级统计

Table 4 Statistics of LS factor grades obtained by DEMs different in resolution corresponding to different geomorphic units

| 地貌单元 Geomorphic unit | 分辨率 Resolution(m) | 各 LS 因子等级所占总面积比例 Area percentage of each grade of LS factor(%) | | | | | 平均 LS 因子 Mean LS factor |
|-----------------------------|----------------------|---|-------|-------|-------|-------|----------------------------|
| | | 0~5 | 5~10 | 10~15 | 15~25 | >25 | |
| 丘陵区 Hilly area | 10 | 68.37 | 22.36 | 7.36 | 1.86 | 0.05 | 4.00 |
| | 25 | 68.42 | 21.93 | 6.72 | 2.77 | 0.17 | 4.06 |
| | 50 | 74.14 | 18.83 | 4.96 | 1.90 | 0.17 | 3.24 |
| | 100 | 82.05 | 12.07 | 4.14 | 1.68 | 0.07 | 2.30 |
| 低山区 Low mountain area | 10 | 43.23 | 29.55 | 17.06 | 8.94 | 1.22 | 7.32 |
| | 25 | 35.88 | 30.26 | 17.04 | 9.31 | 7.51 | 8.70 |
| | 50 | 34.25 | 31.15 | 16.80 | 14.19 | 3.61 | 8.81 |
| | 100 | 36.86 | 25.47 | 16.78 | 16.44 | 4.45 | 8.99 |
| 中山区 Middle mountain area | 10 | 30.16 | 31.26 | 21.90 | 13.04 | 3.63 | 9.46 |
| | 25 | 16.48 | 30.91 | 19.91 | 22.95 | 9.76 | 12.72 |
| | 50 | 12.54 | 28.92 | 19.46 | 24.54 | 14.53 | 14.35 |
| | 100 | 10.60 | 18.47 | 18.52 | 29.12 | 23.30 | 17.23 |

选取 100 m 分辨率 DEM 栅格中心点为样点,按丘陵区、低山区和中山区分别对基准 DEM(10 m)与 25 m、50 m 和 100 m 等三种分辨率 DEM 提取的 LS 因子值进行直线回归方程拟合,不同分辨率 DEM 提取 LS 因子值均表现为极显著相关($p < 0.0001$),用 x_1, x_2, x_3 表示 25 m、50 m、100 m 分辨率 DEM 提取的 LS 因子值, y 表示 10 m 分辨率 DEM 提取的 LS 因

子值,建立拟合回归方程(表 5)。该方程的意义在于,已知低分辨率 DEM 提取某一点的 LS 因子值,可以通过计算获得 10 m 分辨率 DEM 的相应真实值,从而减少误差。然而,由于决定系数 R^2 较小,直线方程拟合程度不高,实际运用过程中可能会带入新的误差。

表 5 不同地貌单元基准 LS 因子 (y) 与各分辨率 (x) 拟合回归方程和决定系数

Table 5 Regression equations and determination coefficients for fitting between benchmark LS factor values and resolutions of different geomorphic units

| 全区 (N = 57 667) Whole area | | 丘陵区 (N = 21 104) Hilly area | | 低山区 (N = 34 554) Low mountain area | | 中山区 (N = 2 009) Middle mountain area | |
|-------------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|---------------------------------------|----------------|---|----------------|
| 拟合方程 Fitting equation | R ² | 拟合方程 Fitting equation | R ² | 拟合方程 Fitting equation | R ² | 拟合方程 Fitting equation | R ² |
| $y = 3.348 + 0.397x_1$ | 0.235 | $y = 2.167 + 0.452x_1$ | 0.232 | $y = 4.351 + 0.341x_1$ | 0.175 | $y = 6.565 + 0.227x_1$ | 0.085 |
| $y = 3.882 + 0.330x_2$ | 0.182 | $y = 2.748 + 0.388x_2$ | 0.154 | $y = 4.912 + 0.273x_2$ | 0.122 | $y = 7.141 + 0.161x_2$ | 0.054 |
| $y = 4.394 + 0.261x_3$ | 0.137 | $y = 3.183 + 0.357x_3$ | 0.115 | $y = 5.557 + 0.196x_3$ | 0.072 | $y = 7.567 + 0.110x_3$ | 0.030 |

注: y, x_1, x_2, x_3 分别表示 10 m、25 m、50 m、100 m 分辨率 DEM 提取的 LS 因子值 Note: y, x_1, x_2, x_3 indicate LS factor values of different resolution of 10 m, 25 m, 50 m, 100 m, respectively

为了进一步明确不同地貌单元 LS 因子差异的机理,选取 100 m 分辨率 DEM 栅格中心点为样点,统计 4 种分辨率 DEM 实验样点坡度、坡长值与 LS 因子值的散点图,比较它们之间的相互关系,用线性相关进行回归模拟,以线性回归的决定系数作为评价标准,决定系数越高表明其回归模拟效果越好,该坡度或坡长因子在 LS 因子中起着越大的主导作用。

从表 6 可以看出,从丘陵区、低山区至中山区,各分辨率 DEM 提取坡度、坡长与 LS 因子均呈现出

极显著的正相关关系,且坡度与 LS 因子拟合方程的决定系数 R^2 逐渐减小,坡长的决定系数 R^2 逐渐增大,而随着分辨率的降低,坡度拟合的 R^2 逐渐增大,坡长拟合的 R^2 逐渐减小,丘陵区坡度拟合方程的决定系数 R^2 远大于坡长,低山区坡度拟合方程的决定系数 R^2 略大于坡长,中山区坡度拟合方程的决定系数 R^2 小于坡长。说明随着起伏度的增加,坡度在 LS 因子中的主导作用越来越弱,坡长发挥着越来越重要的作用,丘陵区坡度在 LS 因子中起主导作用,中山区坡长在其 LS 因子中起主导作用。

表 6 LS 因子 (y) 与坡度 (x_1)、坡长 (x_2) 线性拟合方程和决定系数

Table 6 Linear equations and determination coefficients for fitting between LS factor values and slope gradient and slope length

| 分辨率 Resolution (m) | 丘陵区 (N = 21 104) Hilly area | | 低山区 (N = 34 554) Low mountain area | | 中山区 (N = 2 009) Middle mountain area | | |
|--------------------------|-----------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|--------------------------|---|--------------------------|-------|
| | 直线拟合方程 Linear fitting equation | R ² | 直线拟合方程 Linear fitting equation | R ² | 直线拟合方程 Liner fitting equation | R ² | |
| | 10 | $y = -0.381 + 0.282x_1$ | 0.665 | $y = -1.023 + 0.346 x_1$ | 0.473 | $y = -1.585 + 0.402 x_1$ | 0.322 |
| 坡度 Slope gradient | 25 | $y = -0.724 + 0.420 x_1$ | 0.668 | $y = -1.763 + 0.549 x_1$ | 0.510 | $y = -1.162 + 0.588 x_1$ | 0.274 |
| | 50 | $y = -0.490 + 0.491 x_1$ | 0.660 | $y = -1.752 + 0.664 x_1$ | 0.575 | $y = -2.589 + 0.817 x_1$ | 0.370 |
| | 100 | $y = -0.364 + 0.615 x_1$ | 0.710 | $y = -2.331 + 0.920 x_1$ | 0.639 | $y = -4.658 + 1.234 x_1$ | 0.482 |
| | 10 | $y = 2.745 + 0.050 x_2$ | 0.138 | $y = 4.211 + 0.090 x_2$ | 0.413 | $y = 5.490 + 0.087 x_2$ | 0.541 |
| 坡长 Slope length | 25 | $y = 1.980 + 0.047 x_2$ | 0.262 | $y = 5.145 + 0.045 x_2$ | 0.338 | $y = 9.048 + 0.030 x_2$ | 0.359 |
| | 50 | $y = 1.263 + 0.032 x_2$ | 0.207 | $y = 5.175 + 0.033 x_2$ | 0.274 | $y = 9.154 + 0.028 x_2$ | 0.372 |
| | 100 | $y = 0.968 + 0.012 x_2$ | 0.144 | $y = 4.862 + 0.019 x_2$ | 0.265 | $y = 10.867 + 0.017 x_2$ | 0.310 |

丘陵区地面起伏较小,随着分辨率的降低,DEM 栅格精度降低,坡度变缓,样点 LS 因子值也逐渐减小;中山区地面起伏较大,DEM 栅格的增大忽略了山坡表面细微的起伏变化,坡长延伸,样点 LS 因子值也逐渐增大;而低山区起伏适中,地形复杂,样点 LS 因子值随 DEM 分辨率的变化表现出不确定性。

3 结 论

基于 4 种分辨率 DEM 提取研究区的坡度结果存在明显差异,将 10 m 分辨率 DEM 的提取结果假设为真实值,随着分辨率的降低,坡度整体变缓,精度越低对地形的概括作用越大,100 m 分辨率的坡

度均值降低为 10 m 分辨率的 45.04% ; 坡长以 0 ~ 80 m 的短坡为主, 随着分辨率的降低, 地面坡长明显整体延伸, 且不同分辨率显著增加的坡长等级不同, 同时栅格越大, 坡长取值越单调, 尤其 10 m 分辨率 DEM 的坡长取值不断变化, 而 100 m 分辨率坡长在 200 m 以下只有几个可取值, 提取精度明显降低。同时, 不同分辨率 DEM 计算的 LS 因子平均值变化范围为 6.10 ~ 7.10, 且随着分辨率的降低, 各等级面积变化差异不同, 假设 10 m 分辨率 DEM 提取的 LS 因子值为真实值, 从 25 m 至 100 m, LS 因子平均值逐渐减小, 但均略大于真实值; 从丘陵区至低山区、中山区, 随着分辨率的降低, LS 因子中, 坡度的主导作用越来越弱, 坡长的主导作用越来越强, 丘陵区坡度起主导作用, LS 因子平均值逐渐减小, 中山区坡长起主导作用, LS 因子平均值逐渐增大。此外, 本研究建立的低分辨率与高分辨率之间的 DEM 地形因子转换方程, 在实际应用中可以用来修正低精度 DEM 提取地形因子的误差, 从而提高计算精度。

参考文献

- [1] 汤国安, 赵牡丹, 李天文, 等. DEM 提取黄土高原地面坡度的不确定性. 地理学报, 2003, 58(6): 824—830. Tang G A, Zhao M D, Li T W, et al. Modeling slope uncertainty derived from DEMs in Loess Plateau (In Chinese). Acta Geographica Sinica, 2003, 58(6): 824—830
- [2] 陈楠, 林宗坚, 李成名, 等. 1:10000 及 1:50000 比例尺 DEM 信息容量的比较——以陕北韭园沟流域为例. 测绘科学, 2004, 29(3): 39—41. Chen N, Lin Z J, Li C M, et al. Comparison of information capacity from 1:10000 and 1:50000 scale DEM (In Chinese). Science of Surveying and Mapping, 2004, 29(3): 39—41
- [3] Zhang W H, Montgomery D R. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. Water Resources Research, 1994, 30(4): 1019—1028
- [4] 刘红艳, 杨勤科, 王春梅, 等. 坡度随水平分辨率变化及其空间格局研究. 武汉大学学报: 信息科学版, 2012, 37(1): 105—109. Liu H Y, Yang Q K, Wang C M, et al. Changes of DEM-derived slope with horizontal resolution and their spatial distribution (In Chinese). Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(1): 105—109
- [5] Gao J. Resolution and accuracy of terrain representation by grid DEMs at a micro-scale. International Journal of Geographical Information Science, 1997, 11(2): 199—212
- [6] Thompson J A, Bell J C, Butler C A. Digital elevation model resolution: Effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling. Geoderma, 2001, 100: 67—89
- [7] 董莉, 赖元长. 基于不同尺度 DEM 提取坡度坡向研究. 现代园艺, 2012, 12: 13—16. Dong L, Lai Y C. Research on slope and aspect based on the different scale's DEM (In Chinese). Xiandai Horticulture, 2012, 12: 13—16
- [8] 田国珍, 王平, 王爱玲, 等. 基于两种比例尺坡度的精度分析——以农牧交错带为例. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2006, 42(3): 315—318. Tian G Z, Wang P, Wang A L, et al. Comparison of precision of slope with different scales: A case study in farming-pastoral zone (In Chinese). Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2006, 42(3): 315—318
- [9] 陈燕, 汤国安, 齐清文. 不同空间尺度 DEM 坡度转换图谱分析. 华侨大学学报: 自然科学版, 2004, 25(1): 79—82. Chen Y, Tang G A, Qi Q W. Analysis of slope change atlas drawing from digital elevation models of different spatial scales (In Chinese). Journal of Huaqiao University: Natural Science, 2004, 25(1): 79—82
- [10] 王璇, 罗年学, 张甜. 1:1 万不同分辨率 DEM 提取坡度精度分析. 测绘地理信息, 2009, 34(4): 39—40. Wang X, Luo N X, Zhang T. Precision of slope derived from different resolution DEM (In Chinese). Journal of Geomatics, 2009, 34(4): 39—40
- [11] 郭伟玲, 杨勤科, 程琳, 等. 区域土壤侵蚀定量评价中的坡长因子尺度变换方法. 中国水土保持科学, 2010, 8(4): 73—78. Guo W L, Yang Q K, Cheng L, et al. Re-scaling method of slope length factor in the soil erosion assessment of regional scale (In Chinese). Science of Soil and Water Conservation, 2010, 8(4): 73—78
- [12] 郎玲玲, 程维明, 朱启疆, 等. 多尺度 DEM 提取地势起伏度的对比分析——以福建低山丘陵区为例. 地球信息科学, 2007, 9(6): 1—6. Lang L L, Cheng W M, Zhu Q J, et al. A comparative analysis of the multi criteria DEM extracted relief-Taking Fujian low mountainous region as an example (In Chinese). Geoinformation Science, 2007, 9(6): 1—6
- [13] 李炳元, 潘保田, 韩嘉福. 中国陆地基本地貌类型及其划分指标探讨. 第四纪研究, 2008, 28(4): 535—543. Li B Y, Pan B T, Han J F. Basic terrestrial geomorphological types in China and their circumscriptions (In Chinese). Quaternary Sciences, 2008, 28(4): 535—543
- [14] McCool D K, Foster G R, Weesies G A. Slope length and steepness factors (LS)//Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). USDA Agricultural Handbook, Washington, DC, USA, 1997: 101—141
- [15] Van Remortel R D, Hamilton M E, Hickey R J. Estimating the LS factor for RUSLE through iterative slope length processing of digital elevation data within ArcInfo grid. Cartography, 2001, 30(1): 27—35

GEOMORPHIC FACTORS IN DEM-BASED SOIL EROSION MODELS AS AFFECTED BY RESOLUTION

Guo Chunxiang^{1,2} Liang Yin^{1†} Cao Longxi¹

(Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Gradients and lengths of the slopes in the Lianshui River Basin, Xingguo County, Jiangxi Province were extracted using DEMs different in resolution, i. e. 10m, 25m, 50m and 100m, and analyzed for difference in accuracy difference between the DEMs in calculating the combined gradient and length, using the GIS digital terrain analysis method and the mathematical analysis method. Results show that 1) significant differences exist between slope gradients obtained by DEMs different in resolution, indicating that the gradient decreases with declining resolution and that the lower the accuracy, the greater the generalized effect on terrain information; and that the mean slope gradient obtained by DEM 100m in resolution is only 45.04% of that by DEM 10m in resolution; 2) the slopes in the valley vary in length mainly in the range of 0 ~ 80m and their lengths elongate with declining resolution; and 3) the mean LS factor values obtained by the DEMs regardless of resolution vary in the range from 6.10 to 7.10; the combination of slope gradient and slope length factors reduces the effects of single slope gradient or single slope length factor; and as the topographic fluctuation increases in extent, the dominating role in LS factor shifts from slope gradient to slope length.

Key words DEM; Terrain analysis; Topographic factors; Slope gradient; Slope length

(责任编辑:檀满枝)