

DOI: 10.11766/trxb201706140087

三种重采样方法对冲沟坡度坡长因子的影响*

梁倍瑜^{1, 2} 徐亚莉^{1, 2} 罗明良^{1, 2†} 白雷超³ 慕凯^{1, 2} 岳彦利^{1, 2}

(1 西华师范大学国土资源学院, 四川南充 637009)

(2 西华师范大学地表过程与环境变化研究所, 四川南充 637009)

(3 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要 为探索不同重采样方法对形态差异明显的冲沟坡度坡长 (Slope length and slope steepness, LS) 因子的影响, 以元谋县干热河谷 1:5 000 比例尺的等高线矢量数据为基础, 在 ArcGIS 平台下构建六条典型冲沟 2 m 分辨率的数字高程模型 (Digital elevation model, DEM), 采用最邻近 (Nearest, Near)、双线性 (Bilinear, Bil)、三次卷积 (Cubic, Cub) 重采样的 DEM 计算 LS, 通过相对差系数、LS 因子分级面积比例、XY 散点图对比分析三种重采样方法计算冲沟 LS 的差异性。结果表明: Near 重采样计算的 LS 值与 Bil、Cub 重采样计算的 LS 值差异较大, 相关程度低, Bil 与 Cub 重采样计算的 LS 值差异较小, 相关程度高; 冲沟刚发育时, Cub 重采样要优于 Near 和 Bil, 冲沟侵蚀强烈时, Near 重采样要优于 Bil 和 Cub, 冲沟形态稳定时, Bil 重采样要优于 Cub 和 Near。

关键词 冲沟坡度坡长因子; 最邻近; 双线性; 三次卷积

中图分类号 P208 **文献标识码** A

土壤侵蚀是世界性的环境问题, 是当今全球变化研究的重要内容。国内外对土壤侵蚀预测模型进行了大量研究, 常用模型包括通用土壤流失方程 (Universal Soil Loss Equation, USLE)^[1]、修正通用土壤流失方程 (Revised USLE, RUSLE)^[2]、USPED 模型 (Unit Stream Power-based Erosion Deposition)^[3-5]、水蚀预报项目 (Water Erosion Prediction Project, WEPP)^[6]、EPIC (Erosion Productive Impact Calculator) 模型^[7]等。RUSLE 模型在土壤侵蚀研究中应用广泛, 坡度坡长因子 (Slope Length and Slope Steepness, LS)^[8] 是 RUSLE 模型中的重要评价指标之一, 众多学者对

LS 做了深入研究。赵明松等^[9] 基于 RUSLE 模型分析土壤侵蚀的空间分布特征; 胡刚等^[10] 将基于单位汇水面积的 LS 因子算法和传统基于径流路径长度算法的差异进行对比, 并且分析了不同算法计算 LS 值的适用性^[11]; 祝士杰等^[12] 探讨了黄土高原坡长因子的不确定性; 郭春香^[13] 探讨不同分辨率 DEM 对 LS 因子的影响。以往研究主要集中在 LS 的提取及其空间分布特征、DEM 分辨率对 LS 的影响上, 当改变 DEM 的数据格网尺寸时, 不同的重采样方法对 LS 的影响研究较少。

重采样是地理学研究中尺度转换的关键环节, 针对重采样对地形分析结果的影响, 众多学者展开

* 国家自然科学基金项目 (41101348, 41101360)、西华师范大学基本科研业务费专项资金项目 (15C002); 绵阳师范学院四川省生态安全与保护重点实验室 (ESP1606)。Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41101348, 41101360); Basic Research Projects Financed from the Special Fund of China West Normal University (No. 15C002); Ecological Security and Protection Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang Normal University (No. ESP1606)

† 通讯作者: 罗明良 (1978—), 男, 河南信阳人, 教授, 硕士生导师, 主要从事 GIS 空间分析及 DEM 数字地形分析研究。E-mail: lolean586@163.com

作者简介: 梁倍瑜 (1991—), 女, 四川泸州人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: 1447840470@qq.com

收稿日期: 2017-06-14; 收到修改稿日期: 2017-09-01; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2017-09-26

了研究，张良^[14]分析了最邻近（Near）、双线性（Bil）、三次卷积（Cub）三种重采样方法的差异及其尺度转换后的误差；陈永刚等^[15]进一步对比Near、Bil、Cub重采样误差的空间分布特征，以及坡度和采样方法对重采样误差的影响；王雷等^[16]讨论了重采样方法对DEM数据质量的影响；高一平^[17]探讨了不同重采样方法对不同地貌区的平滑拟合效果。上述研究对于深刻理解不同重采样对DEM数据质量的影响具有重要意义，然而这些研究大多针对重采样算法内部机制的差异和重采样后坡度等单个地形因子的变化，在RUSLE模型中，地形因子LS是以坡度、坡长组合的形式出现，目前针对不同的重采样方法对LS的影响研究较少。另一方面，在具体采用哪种重采样方法的问题上，对于大范围的地貌区，如平原、丘陵、山地，有一定研究，但针对小范围的冲沟，特别当冲沟分别处于发育初级阶段、侵蚀强烈阶段、形态稳定阶段时，重采样的适宜性分析较少。

基于此，本文在总结前人研究成果和研究经验的基础上，利用地貌学、水土保持学、GIS等方面的基本理论和方法，以云南元谋干热河谷地区发育初期的冲沟、侵蚀强烈的冲沟、形态稳定的冲沟三种地貌类型中的六个典型样区为研究对象，研究Near、Bil、Cub三种重采样方法对处于不同发育阶

段的冲沟的LS因子的影响，以期为该区域土壤侵蚀的评估、水土流失的预测分析提供参考。

1 数据与方法

1.1 数据来源

元谋干热河谷位于云南省滇中高原北部，构造上属于川滇南北构造，是断陷盆地之一^[18]。其东部、南部和北部为山地，西部多山冈和丘陵^[19]。元谋组地层广泛分布，岩性松散^[20]，自上而下分别为砂、粉砂、黏土、亚黏土及砂砾互层^[21]。地形破碎，千沟万壑，冲沟侵蚀最为严重^[19]。

本文以云南省元谋县干热河谷1:5 000比例尺的等高线数据为基础，在ArcGIS平台下通过地统计分析工具中的反距离加权插值生成2 m分辨率的DEM，以此DEM数据为基础，计算该区的面积高程积分（Hypsometric Integral, HI）^[22]，通过HI将元谋县干热河谷区的冲沟地貌划分为三种类型：发育初期的冲沟（HI大于0.6）、侵蚀强烈的冲沟（HI大于0.35且小于0.6）、形态稳定的冲沟（HI小于0.35）。为了更好地反映不同地貌类型与土壤侵蚀模型中LS的关系，本实验选取三个发育阶段中具有代表性的6个样区作为研究对象，六个样区分别为发育初期的冲沟A₁、A₂，侵蚀强烈的冲沟

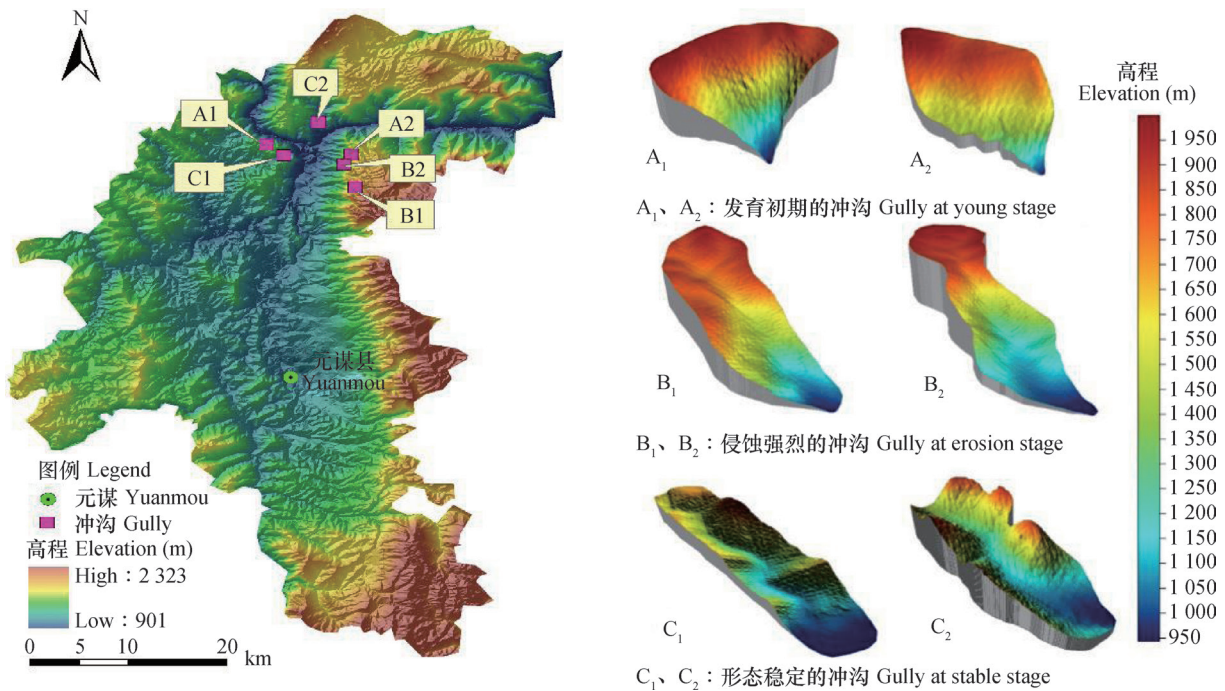


图1 研究样区

Fig. 1 Map of the study area

表1 实验样区基本信息

Table 1 Basic information about the study area

	最大高程 The highest Elevation (m)	最小高程 The lowest elevation (m)	最大高差 The biggest height difference (m)	平均坡度 Mean slope (°)	面积 Area (km ²)
A ₁	1 506	1 061	445	22.17	0.82
A ₂	1 888	1 610	277	13.11	0.76
B ₁	2 225	1 317	907	22.59	1.19
B ₂	2 000	943	1 056	19.69	1.04
C ₁	1 425	929	496	19.79	1.45
C ₂	1 166	946	220	15.42	1.55

B₁、B₂，形态稳定的冲沟C₁、C₂。

1.2 重采样方法

本文采用了Near、Bil、Cub三种不同的重采样方法构建DEM。

(1) 最邻近法Near就是将输出图像中像元的位置定位到原图像中，找出距离输出栅格单元中心最近的输入像元，将该像元的值作为输出图像像元的值^[14]。该方法程序简单，执行速度快，不会改变原图像中的像元值，相对Bil、Cub采样方法而言具有较好的稳定性；缺点是精度不高，对图像做大尺度转换时，使用Near会丢失较多的像元信息。

(2) 双线性法Bil是在水平和垂直方向上，对原图像中输出像元附近2×2区域的四个像元的值进行加权平均，然后将计算结果作为输出像元的值^[23]。相对于Near算法而言，其精度更高，输出数据面更平滑，当然计算量也更大，且会改变原始图像中的像元值^[24]。

(3) 三次卷积插值法Cubic又称为双三次插值法^[25]，对原图像中4×4邻域内的16个像元进行加权平均，确定新像元的值，是三种重采样方法中精度最高的，但也是计算量最大的^[26]。

1.3 LS因子计算方法

在土壤侵蚀模型中，有很多种LS因子的算法，包括Moore和Wilson^[8]、McCool等^[27]、Desmet和Govers^[28]、Böhner和Selige^[29]、张宪奎等^[30]算法和Liu等^[31]算法等。Moore算法是在单位径流能量理论上提出的，该算法中坡长用单位汇水面积代替，其计算公式如下：

$$LS = (\alpha + 1) \left(\frac{A_s}{22.13} \right)^\alpha \left(\frac{\sin \beta}{0.0896} \right)^\eta \quad (1)$$

式中， α 、 η 为系数， $\alpha=0.4$ ， $\eta=1.3$ ， A_s 为单位汇水面积， m^2m^{-1} ，即单位长度等高线的上游汇水面积， β 为以弧度表示的坡度。 A_s 表示单位汇水面积，更能反应现实地形中，径流汇集和分散对侵蚀的影响，该公式较适合地形复杂区坡度坡长因子的计算^[32]。考虑到元谋干热河谷区复杂的地形地貌情况，选用Moore算法计算LS因子。

1.4 相对差系数

三种重采样方法Near、Bil、Cub所得到的DEM相同单元上的LS值并不一致。当两种算法相互比较时，选择一种为基准算法，另一种为比较算法。基准算法和比较算法所得到的LS值分别为 LS_{base} 和 LS_{comp} ，相对差系数可表示为 α ，计算公式为^[33]：

$$\alpha = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (LS_{comp}^i - LS_{base}^i)^2}{\sum_{i=1}^n (LS_{comp}^i - \overline{LS_{base}^i})^2} \quad (2)$$

式中， LS_{base}^i 表示基准算法在第*i*栅格单元处的LS值， $\overline{LS_{base}^i}$ 为整幅DEM上的LS均值， LS_{comp}^i 为比较算法在相应位置处的LS值。

假设基准算法和比较算法采用斜率为1的直线来拟合，那么相对差系数 α 反应了比较算法和基准算法之间整体偏离程度。若 $\alpha=1$ ，两种算法所得结果一致，算法之间不存在差异；若 $0 < \alpha < 1$ ， α 值越小，两种算法之间的差异就越大；若 $\alpha < 0$ ，两种算法之间没有可比性^[33]。

2 结果

2.1 基于相对差系数的不同重采样的LS差异性

冲沟各个发育阶段的相对差系数如表2所示。

表2 不同重采样方法的相对差系数

Table 2 Relative difference coefficients of the different resampling methods

	基准算法 Benchmark algorithm		
	最邻近 Near	双线性 Bil	三次卷积 Cub
最邻近 Near		(0.09, 0.04, 0.15, -0.02, 0.12, 0.16)	(0.11, 0.06, 0.18, 0.02, 0.10, 0.15)
双线性 Bil	(0.06, 0.02, 0.13, -0.01, 0.09, 0.12)		(0.68, 0.68, 0.75, 0.76, 0.68, 0.71)
三次卷积 Cub	(0.09, 0.05, 0.17, 0.01, 0.09, 0.14)	(0.68, 0.68, 0.76, 0.76, 0.69, 0.71)	

表2中每一个六元组 (a, b, c, d, e, f) 含义为: a、b表示发育初期的冲沟A₁、A₂分别计算得到的相对差系数, c、d表示侵蚀强烈的冲沟B₁、B₂分别计算得到的相对差系数, e、f表示形态稳定的冲沟C₁、C₂分别计算得到的相对差系数。

由表2可以看出, 当Near与Bil、Cub分别比较时, A₁、A₂, B₁、B₂, C₁、C₂三个发育阶段六条冲沟的相对差系数 α 均小于0.2, α 在0到1范围内, 其值越趋近于0, 两种重采样方法计算的LS值的差异性越大, 说明用Near重采样得到的LS值与用Bil、Cub重采样得到的LS值差异性较大。当Bil与Cub相互比较时, A₁、A₂, B₁、B₂, C₁、C₂三个发育阶段六条冲沟的相对差系数 α 均大于等于0.68, 说明Bil、Cub两种重采样方法得到的LS值差异性较小, 具有一定的相似性。

从冲沟的发育阶段来看, 形态稳定的冲沟C₁、C₂相对差系数的平均值最大, α 为0.12; 其次是侵蚀强烈的冲沟B₁、B₂, 相对差系数的平均值为0.08, 但其相对差系数变化幅度较大, α 最高达到0.18, 最小仅为-0.02; 发育初期的冲沟A₁、A₂, 相对差系数的平均值最小, α 为0.07。发育初期的冲沟中, 三种重采样方法的差异性最大, 形态稳定的冲沟中, 其差异最小, 侵蚀强烈的冲沟中, 规律不明显存在不确定性。

2.2 基于LS因子分级面积比例的不同重采样的LS差异性

图2为三个发育阶段六个样区的LS因子分级面积比例图。Original为原始高精度2m DEM计算的LS, Near、Bil、Cub为三种重采样后4m DEM分别计算的LS。根据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、

15~20、>20共5个等级, 图2中不同重采样DEM计算的LS因子分级面积比例变化趋势如下: LS因子在0~5等级内分布最广, 从5~10至15~20逐渐减小, 从15~20至>20, 逐渐增大; 以原始数据提取的LS值为参照, 重采样后计算的LS值分别与之对比, 0~5等级内, LS因子的面积比例损失量最大, 为正值; >20等级内, 损失量次之, 为负值; 中间区域(5~20), 损失量最小, 为负值。说明重采样对LS值的影响, 主要集中在小值区间(0~5)和大值区间(>20), 对中间区域(5~20)影响不大。

为定量地对比各发育阶段三种重采样计算的LS与原始DEM计算的LS之间的差异性, 对图2中各折线与X轴所围成的面积进行统计得到表3。通过表3可以看出, 在发育初期的冲沟A₁、A₂中, 与原始DEM获得的LS最接近的是Cub, 在侵蚀强烈的冲沟B₁、B₂中, 与原始DEM获得的LS最接近的是Near, 在形态稳定的冲沟C₁、C₂中, 与原始DEM获得的LS最接近的是Bil。

2.3 基于散点分布图的不同重采样的差异

散点分布图常用来比较两个数据集之间的相关性和相似性, 以原始2m DEM计算的LS为X轴, Near、Bil、Cub三种重采样计算的LS分别为Y轴, 得到图3中的XY散点分布图。如果两种重采样方法所产生的LS值相同, 那么XY散点分布图表现为斜率为1的直线, 函数关系为Y=X; 如果两种重采样方法所产生的LS值不完全相同但有一定联系, 那么函数关系为Y=a+bX, a越偏离0或者b越偏离1, 则两种重采样方法计算出LS值差别就越大; 如果XY散点分布图毫无规律, 那么两种重采样对LS值的影响没有可比性。表4是在图3基础上, 按照

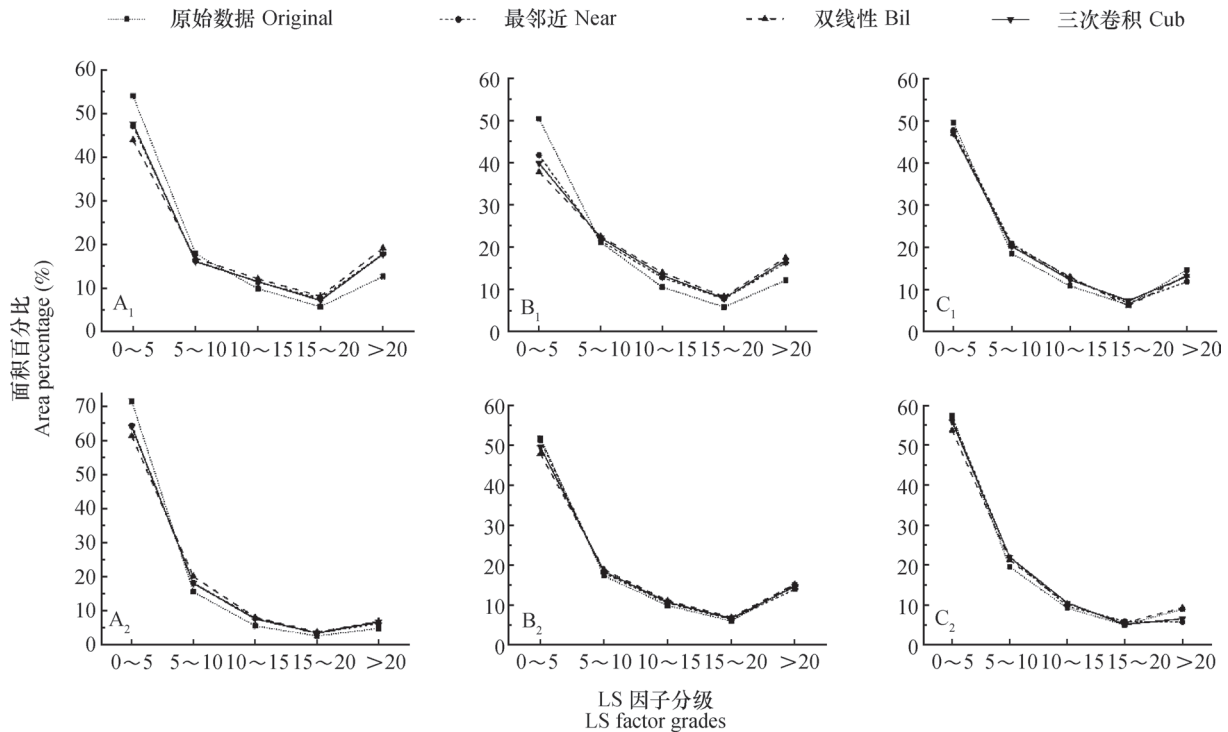


图2 LS因子分级面积比例图

Fig. 2 Area percentage of LS factor grades

表3 不同重采样LS因子分级面积比例统计

Table 3 Statistics of area percentage of LS factor grades of the different resampling methods

重采样Resample	A ₁	A ₂	B ₁	B ₂	C ₁	C ₂
原始数据Original	66.67	61.84	68.72	66.58	67.85	66.86
最邻近Near	67.59	64.68	70.99	67.43	70.21	68.76
双线性Bil	68.51	65.91	72.37	68.46	69.84	68.52
三次卷积Cub	67.32	64.56	71.65	67.87	69.95	68.81

$Y=a+bX$ 拟合的函数关系式。

原始DEM为2 m, 重采样后DEM为4 m, 分辨率的不同减弱了散点分布图的集中性, 所以图3中, 三个发育阶段六个样区的散点分布较离散, 规律性减弱。但相对而言, 在A₁、A₂发育初期的冲沟中, Cub的散点分布较Near、Bil更集中; 在B₁、B₂侵蚀强烈的冲沟中, Near的散点分布较Cub、Bil更集中; 在C₁、C₂形态稳定的冲沟中, Bil的散点分布较Near、Cub更集中。

表4是在图3基础上拟合的回归方程, 以线性回归的决定系数 R^2 作为评价标准, 决定系数越高说明其回归模拟的效果越好, 该重采样获得的LS与原始数据获得的LS的相关性越高。在A₁、A₂中, R^2 最高的是Cub, 其值分别为0.157 7、0.148 1, 在

B₁、B₂中, R^2 最高的是Near, 其值分别为0.148 4、0.127 5, 在C₁、C₂中, R^2 最高的是Bil, 其值分别为0.164 1、0.167 9。

3 讨论

3.1 地貌差异、DEM格网大小及解算方法对LS因子的影响

在Moore算法中, LS因子是表示地表径流的挟沙能力^[8], 在土壤侵蚀模型RUSLE中, 当其他变量一定时, LS因子值越大, 反应的水土流失情况越严重。六个典型冲沟中, 从发育初期的冲沟至侵蚀强烈的冲沟、形态稳定的冲沟, LS因子在0~5等级内的面积占总面积的百分比最大, 约50%。从

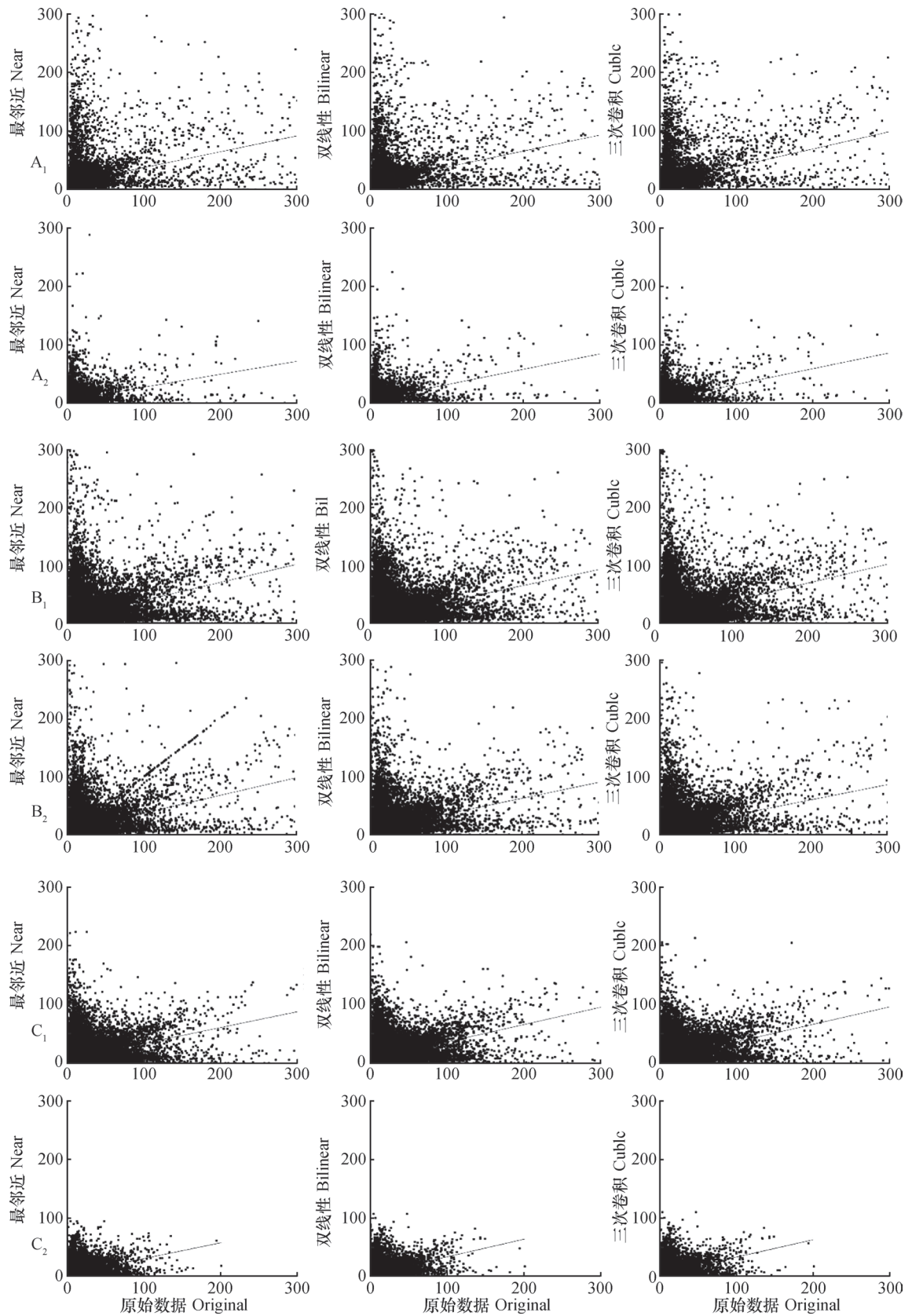


图3 LS的XY散点分布图

Fig. 3 XY scatter plot for LS

表4 不同重采样方法的相关关系

Table 4 Correlations of the different resampling methods

	拟合方程 Fitting equation	R^2	拟合方程 Fitting equation	R^2	拟合方程 Fitting equation	R^2
	A_1		B_1		C_1	
Near	$y = 0.271 2x + 10.125$	0.130 7	$y = 0.309 3x + 8.476 7$	0.148 4	$y = 0.270 1x + 6.549 8$	0.128 9
Bil	$y = 0.273 4x + 10.735$	0.136 7	$y = 0.276 3x + 9.582 6$	0.119 9	$y = 0.295x + 6.689 6$	0.164 1
Cub	$y = 0.294 8x + 10.136$	0.157 7	$y = 0.310 5x + 8.871 8$	0.143 3	$y = 0.297 7x + 6.421 4$	0.161 7
	A_2		B_2		C_2	
Near	$y = 0.220 8x + 4.765 6$	0.100 4	$y = 0.302 5x + 7.626 3$	0.127 5	$y = 0.269 8x + 4.542 4$	0.131 3
Bil	$y = 0.262 6x + 4.856 7$	0.139	$y = 0.272x + 8.323 1$	0.125 2	$y = 0.299 8x + 4.674$	0.167 9
Cub	$y = 0.269 3x + 4.603 8$	0.148 1	$y = 0.259 2x + 8.217 4$	0.114 1	$y = 0.295 5x + 4.492 2$	0.160 2

我国区域差异上看,东北漫岗丘陵区LS因子值主要分布在0.5以下,其面积占76.5%;黄土高原区LS因子值主要分布在5以上;北方土石山区LS因子值主要分布在0.5至20之间^[34]。本研究所提取的干热河谷形态差异明显的六个典型冲沟的LS因子值,总体上大于东北漫岗丘陵区,小于黄土高原区,地表径流的挟沙能力依然很强,基本吻合该区域土壤侵蚀实际情况。

重采样是地理学研究中尺度转换的关键环节,通过重采样可实现栅格数据从小格网尺寸向大格网尺寸的转换,从而改变DEM的分辨率继而影响多尺度DEM下的LS因子。本研究从发育初期的冲沟至侵蚀强烈的冲沟、形态稳定的冲沟,随着DEM格网分辨率的降低,各个冲沟的LS因子均逐渐减小,这与李蒙蒙等^[35]的研究结论相似。郭春香等^[13]基于2.1 km × 2.1 km的DEM数据,对579 km²县域单元的LS因子进行研究,结果表明随着分辨率的降低,LS因子在丘陵区逐渐减小,在低山区和中山区逐渐增大;张宏鸣等^[36]使用与Moore算法不同的Liu等算法^[31],计算了梯田区与非梯田区的LS因子,认为随着DEM分辨率的降低,梯田区LS因子逐渐增大,非梯田区LS因子在小幅升高后持续降低。这两项研究看似与本研究结论相矛盾,但其实质是一样的,均反映宏观地貌单元的面积、DEM格网分辨率以及LS解算方法对LS因子值的影响。

就元谋地区而言,其旱季高温干燥,雨季降水集中,冲沟极为发育,冲沟网络蚕食耕地,产生大量泥沙,加剧土壤退化,提高冲沟土壤侵蚀模型的预测精度对元谋地区水土流失评估有重要意义。

LS因子作为土壤侵蚀模型的重要参数,在尺度转换中,重采样方法的不同对LS值有显著影响,不同地貌区重采样方法的适宜性也不一样,选用恰当的重采样方法可提高LS因子计算的精度。研究表明,基于2m × 2m分辨率的DEM, Cub重采样适合于发育初期的冲沟, Near重采样适合于侵蚀强烈的冲沟, Bil重采样更符合形态稳定的冲沟的实际情况。

3.2 重采样方法地形适应性的机理

不同发育期的冲沟地形,其地表形态空间异质性的差异,一定程度上影响了重采样方法在不同地形条件下的适应性。

发育初期的冲沟,坡面以细流为主,坡面的完整性较好,待估值与直接邻点、间接邻点的相关性均很高, Cub重采样通过对原图像中4 × 4邻域内的16个像元进行加权平均,确定新像元的值^[14],不仅考虑所有直接邻点的影响,还考虑了所有间接邻点的影响,此时重采样覆盖的范围最广,得到的地形信息更接近于原始DEM,因而对于发育初期的冲沟, Cub更优。

侵蚀强烈的冲沟,地表破碎,地形起伏大,地形局部变异程度强。 Bil、 Cub重采样方法所采用的数学函数曲面较实际地表光滑,使得在凹地形区重采样高程较实际值大;在凸形地区,则恰好相反^[16]。因此在地形发生较剧烈转折的地方,采用 Bil、 Cub时,数据边缘易被锐化,极值丢失现象严重,误差较大,相比而言 Near重采样不会造成栅格数据中极值点和不确定点的丢失^[17],上述地表形态的变化,会对LS因子的计算产生影响,因而对

于侵蚀强烈的冲沟，Near重采样更适合。

形态稳定的冲沟，经历过强烈的侵蚀，冲沟的坡面被分割为若干单元，虽然此阶段地形较和缓，但相比发育初期的冲沟，地表的完整性较差，地表形态具有一定的异质性，待估值与直接邻点的相似性强，但与间接邻点的相似性弱，Bil通过对原图像中输出像元附近 2×2 区域的四个像元的值进行加权平均，得到输出像元的值^[23]，考虑了所有直接邻近点的影响，又避免了间接邻点中其他不同地表单元的干扰，所以此时使用Bil重采样后，计算LS更优。

4 结 论

基于元谋县干热河谷形态差异明显的六个典型冲沟的DEM，探讨了三种不同重采样方法对冲沟LS值的影响。主要结论如下：（1）Cub重采样适合于发育初期的冲沟，此阶段采用Cub重采样计算的LS值与原始DEM计算的LS值相比差异最小；Near重采样有效地避免了栅格数据中极值点和不确定点的丢失，对于侵蚀强烈的冲沟，Near重采样最优；Bil重采样反应了直接邻点中地表单元的信息，又避免了间接邻点中其他不同地表单元的干扰，更符合形态稳定的冲沟的实际情况；（2）不同重采样算法内部的差异在LS计算结果中也有所体现，Near重采样后的LS值与Bil、Cub重采样后的LS值相比差异较大，而Bil、Cub两种重采样间的LS值差异性较小；（3）重采样对小值区间（0~5）和大值区间（>20）的LS值较敏感，对中间区域（5~20）的LS值并不敏感。对不同发育阶段不同地貌形态的冲沟，进行栅格数据尺度转换时，选择适当的重采样算法，可提高计算的精度。本文初步对比了三种重采样对不同发育冲沟LS因子的影响，但LS因子解算方法尚待完善，如结合重采样过程中单位汇水面积、坡度因子的统计特征、空间变异特征及其机理等多方面因素，有利于更加全面、合理地评价重采样对不同发育冲沟LS值的影响。此外，有限的研究数据也影响着结果分析。因此，后续研究仍需在充分的数据保障条件下，对DEM格网、地貌差异、LS解算方法如何相互影响等方面，进行定量分析。

参 考 文 献

- [1] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning with universal soil loss equation (USLE). Washington, USA: Department of Agriculture, 1978
- [2] 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) Washington, USA: Department of Agriculture, 1997
- [3] Mitas L, Mitasova H. Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention. Water Resources Research, 1998, 34 (3): 505—516
- [4] Mitasova H, Hofierka J, Zlocha M, et al. Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS. International Journal of Geographical Information Systems, 1996, 10 (5): 629—641
- [5] 徐亚莉, 罗明良, 梁倍瑜, 等. DEM空间插值方法对土壤侵蚀模拟的影响研究——以USPED分析干热河谷典型冲沟为例. 地理科学进展, 2016, 35 (7): 870—877
Xu Y L, Luo M L, Liang B Y, et al. Effects of different DEM spatial interpolation methods on soil erosion simulation: A case study of a typical gully of dry-hot valley based on USPED (In Chinese). Progress in Geography, 2016, 35 (7): 870—877
- [6] 汪东川, 卢玉东. 国外土壤侵蚀模型发展概述. 中国水土保持科学, 2004, 2 (2): 35—40
Wang D C, Lu Y D. Development of soil erosion models abroad (In Chinese). Science of Soil and Water Conservation, 2004, 2 (2): 35—40
- [7] Williams J R, Jones C A, Kiniry J R, et al. The EPIC crop growth model. Transactions of the Asae, 1989, 32 (2): 497—511
- [8] Moore I D, Wilson J P. Length slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation. Journal of Soil and Water Conservation, 1992, 47 (5): 423—428
- [9] 赵明松, 李德成, 张甘霖, 等. 基于RUSLE模型的安徽省土壤侵蚀及其养分流失评估. 土壤学报, 2016, 53 (1): 28—38
Zhao M S, Li D C, Zhang G L, et al. Evaluation of soil erosion and soil nutrient loss in Anhui Province based on RUSLE model (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2016, 53 (1): 28—38
- [10] 胡刚, 宋慧, 石星军. 基于单位汇水面积的地形因子特

- 征评价. 地理科学, 2016, 36 (4): 621—627
Hu G, Song H, Shi X J. Evaluation of topography factors based on the unit contributing catchment area (In Chinese). *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36 (4): 621—627
- [11] 胡刚, 宋慧, 石星军, 等. 卧虎山水库不同算法LS因子值适用性分析. 地理科学, 2015, 35 (11): 1482—1488
Hu G, Song H, Shi X J, et al. The applicability of LS factor value from different algorithms in Wohushan Reservoir basin (In Chinese). *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35 (11): 1482—1488
- [12] Zhu S J, Tang G A, Xiong L Y, et al. Uncertainty of slope length derived from Digital Elevation Models of the Loess Plateau, China. *Journal of Mountain Science (JMS)*, 2014, 11 (5): 1169—1181
- [13] 郭春香, 梁音, 曹龙焘. 基于四种分辨率DEM的侵蚀模型地形因子差异分析. 土壤学报, 2014, 51 (3): 482—489
Guo C X, Liang Y, Cao L X. Geomorphic factors in DEM-based soil erosion models as affected by resolution (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (3): 482—489
- [14] 张良. 遥感陆表特征参量产品真实性检验关键技术与系统实现. 四川: 电子科技大学, 2015
Zhang L. The research of the validation of remote sensing land surface products and system implementation (In Chinese). Sichuan: University of Electronic Science and Technology of China, 2015
- [15] 陈永刚, 汤国安, 祝士杰. DEM重采样误差空间分布格局及差异性分析. 中国矿业大学学报, 2011, 40 (4): 653—659
Chen Y G, Tang G A, Zhu S J. Spatial point pattern of DEM re-sampling error and difference analysis of influence factor (In Chinese). *Journal of China University of Mining & Technology*, 2011, 40 (4): 653—659
- [16] 王雷, 龙永清, 杨勤科. 重采样方法对DEM数据质量的影响. 水土保持通报, 2016, 36 (4): 72—77
Wang L, Long Y Q, Yang Q K. Effects of resampling method on data quality of DEMs (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36 (4): 72—77
- [17] 高一平. 基于SRTM数据的地形坡度分级多边形合并方法与应用研究. 山西: 太原理工大学, 2012
Gao Y P. Approach and application of topographic slope gradation polygon aggregation based on SRTM (In Chinese). Shanxi: Taiyuan University of Technology, 2012
- [18] 舒成强, 何政伟, 张斌, 等. 元谋干热河谷强侵蚀区土桥发育特征与演化过程. 热带地理, 2014, 34 (3): 344—350
Shu C Q, He Z W, Zhang B, et al. Morphological characteristics and evolution process of soil bridge in Yuanmou Dry-Hot Valley (In Chinese). *Tropical Geography*, 2014, 34 (3): 344—350
- [19] 邓青春, 张斌, 罗君, 等. 元谋干热河谷潜蚀地貌的类型及形成条件. 干旱区资源与环境, 2014, 28 (8): 138—144
Deng Q C, Zhang B, Luo J, et al. Types and controlling factors of piping landform in Yuanmou dry-hot valley (In Chinese). *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28 (8): 138—144
- [20] 钱方, 周国兴. 元谋第四纪地质与古人类. 北京: 科学出版社, 1991
Qian F, Zhou G X. Quaternary geology and fossil man in Yuanmou (In Chinese). Beijing: Science Press, 1991
- [21] 张斌, 史凯, 刘春琼, 等. 元谋干热河谷近50年分季节降水变化的DFA分析. 地理科学, 2009, 29 (4): 561—566
Zhang B, Shi K, Liu C Q, et al. Changes of seasonal precipitation of Yuanmou dry-hot valley in recent 50 years based on method of DFA (In Chinese). *Scientia Geographica Sinica*, 2009, 29 (4): 561—566
- [22] Molin P, Pazzaglia F J, Dramis F. Geomorphic expression of active tectonics in a rapidly-deforming forearc, silamassif, Calabria, Southern Italy. *American Journal of Science*, 2004, 304 (7): 559—589
- [23] 尤玉虎, 周孝宽. 数字图像最佳插值算法研究. 中国空间科学技术, 2006, 25 (3): 14—18
You Y H, Zhou X K. Research of optimal interpolation algorithm for digital image (In Chinese). *Chinese Space Science and Technology*, 2006, 25 (3): 14—18
- [24] 张祖勋. 影像灰度内插的研究. 测绘学报, 1983, 12 (3): 178—188
Zhang Z X. On the gray value interpolation of image elements (In Chinese). *Acta Geodetica et Cartographica Sinica*, 1983, 12 (3): 178—188
- [25] Keys R. Cubic convolution interpolation for digital image processing. *Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on*, 1981, 29 (6): 1153—1160
- [26] Park S K, Schowengerdt R A. Image reconstruction by parametric cubic convolution. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1983, 23 (3): 258—272
- [27] McCool D K, Foster G R, Weesies G A. Slope length

- and steepness factors (LS) //Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Washington (DC):USDA, 1997: 101—141
- [28] Desmet P J J, Govers G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Soil Water Conservation*, 1996, 51 (5): 427—433
- [29] Bohner J, Selige T. Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation, analysis and modelling applications. Gottingen: Gottinger Geographische Abhandlungen, 2006
- [30] 张宪奎, 许靖华, 卢秀琴, 等. 黑龙江省土壤流失方程的研究. *水土保持通报*, 1992, 12 (4): 1—9, 18
Zhang X K, Xu J H, Lu X Q, et al. A study on the soil loss equation in Heilongjiang Province (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1992, 12 (4): 1—9, 18
- [31] Liu B Y, Nearing M A, Shi P J, et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64 (5): 1759—1763
- [32] 胡刚, 宋慧, 刘宝元, 等. 黑土区基准坡长和LS算法对地形因子的影响. *农业工程学报*, 2015, 31 (3): 166—173
Hu G, Song H, Liu B Y, et al. Effects of both slope length of standard plot and algorithms of LS on calculated values of topography factor (LS) in black soil areas in Northeast China (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31 (3): 166—173
- [33] 刘学军, 晋蓓, 王彦芳. DEM流径算法的相似性分析. *地理研究*, 2008, 27 (6): 1347—1357
Liu X J, Jin B, Wang Y F. Similarity analysis of flow route algorithms for extracting drainage network from grid-based terrain model (In Chinese). *Geographical Research*, 2008, 27 (6): 1347—1357
- [34] 郭明航, 杨勤科, 王春梅. 中国主要水蚀典型区侵蚀地形特征分析. *农业工程学报*, 2013, 29 (13): 81—89+307—308
Guo M H, Yang Q K, Wang C M. Analysis on erosional terrain characteristics of typical samples in main water erosion region of China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29 (13): 81—89+307—308
- [35] 李蒙蒙, 赵媛媛, 高广磊, 等. DEM分辨率对地形因子提取精度的影响. *中国水土保持科学*, 2016, 14 (5): 15—22
Li M M, Zhao Y Y, Gao G L, et al. Effects of DEM resolution on the accuracy of topographic factor derived from DEM. *Science of Soil and Water Conservation*, 2016, 14 (5): 15—22
- [36] 张宏鸣, 杨勤科, 王猛, 等. 梯田区侵蚀地形因子随分辨率变化的特征分析. *农业机械学报*, 2017 (9): 1—12
Zhang H M, Yang Q K, Wang M, et al. Analysis of DEM resolution on erosional terrain characteristics of terrace area. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017 (9): 1—12

Difference Analysis of Three Resampling Methods for Calculating LS of Gullies Different in Development Stage

LIANG Beiyu^{1, 2} XU Yali^{1, 2} LUO Mingliang^{1, 2†} BAI Leichao³ MU Kai^{1, 2} YUE Yanli^{1, 2}

(1 Land and Resources School, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637009, China)

(2 Institute of Landform Surface Processes and Environmental Changes, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637009, China)

(3 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract 【Objective】 Multi-resolution DEM (digital elevation model) resample plays the important role in multi-scale DEM conversion, this paper was aiming to investigate influences of the use of difference resampling methods to calculate LS of gullies different in development stage. 【Method】 Based on the vector data in the 1 : 5 000 scale contour map of the Ganre River Valley in Yuanmou County, DEMs, 2m in resolution, of six typical gullies were established on the ArcGIS platform, using three different resampling methods, known as Near (Nearest neighbor), Bil (Bilinear interpolation) and Cubic (Cubic

convolution), and LS (Slope Length and Slope Steepness, LS) calculated for comparison quantitatively. Differences between the three methods in LS calculation were analyzed by comparison of the methods in relative difference coefficient, area percentage of LS factor grades, and XY scatter plot. **【Result】** Results of the paper are summarized as follows: (1) Near is significantly different from Bil and Cub in LS value, while Bil and Cub methods have no significant difference between each other; (2) Bil, rather than Near and Cub, is the most appropriate choice for gullies at their young stage; Near is better than Bil and Cub for gullies at their erosion stage; Cub is more suitable than Near and Bil for gullies at their stable stage. **【Conclusion】** In conclusion, the research described in this paper has shown that the choice of resampling methods has potentially important consequences for the calculation of LS value of gullies different in development stage.

Key words Slope length and slope steepness; Nearest; Bilinear Cubic

(责任编辑: 檀满枝)