



坡度截断对分布式土壤侵蚀学坡长提取的影响

张宏鸣¹ 王 猛¹ 杨勤科² 晋 蓓¹ 王美丽¹ 李 锐^{1,3}

1 西北农林科技大学,陕西 杨凌,712100

2 西北大学城市与环境学院,陕西 西安,710069

3 中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌,712100

摘 要:地形是影响土壤侵蚀的重要因子,分布式土壤侵蚀学坡长是地形因子的重要参数。坡长与土壤侵蚀过程相适应,在一定条件下停止累计而截断。坡度变化是坡长提取的截断条件之一,但坡度变化对提取结果的影响研究还不够深入。以数学曲面和黄土高原县南沟流域的数字高程模型作为数据源,使用 LS_TOOL 方法提取坡长,并对坡度变化引起的坡长截断结果进行对比和主成分分析。结果表明,下坡坡度减小幅度越大,坡度截断效果越明显;坡度小于 2.86° 的截断参数 R_1 和坡度大于或等于 2.86° 的截断参数 R_2 与坡长最大值和坡长平均值均正相关;在黄土高原地区,陡坡、沟道较多,相对 R_2 的影响, R_1 对坡长的影响较小。坡度变化的截断设置在 $R_1 > 0.7, R_2 > 0.5$ 时,坡长变化较明显,建议黄土高原地区侵蚀坡长的坡度截断设置值为 $R_1 = 0.7, R_2 = 0.5$ 。

关键词:土壤侵蚀;通用水土流失方程;地形因子;侵蚀学坡长;坡度截断参数

中图分类号:P208;S157

文献标志码:A

地形是土壤侵蚀和水土保持措施布设的重要影响因子,坡度和坡长是侵蚀模型最主要的地形参数^[1],但如何在流域尺度上快速、准确地提取坡度和坡长,一直以来都是困扰土壤侵蚀研究的难题,其中坡长问题尤为突出。

坡面水文学和土壤侵蚀学研究表明,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。从径流起点沿垂直等高线方向到径流终点,径流所经过路径的水平距离即为坡长。分布式土壤侵蚀学坡长(简称侵蚀学坡长)与坡面土壤侵蚀过程(包括剥蚀、搬运和沉积)相适应,在一定条件下停止累计运算(截断),继而重新开始^[2]。显然,如果不考虑截断,径流长度、流线长度或坡度线长度与坡长值基本一致。侵蚀学坡长最早结合土壤侵蚀因子和预报方程进行研究,在通用土壤流失方程、修正的通用土壤流失方程^[3]和中国水土流失方程^[4]中均使用这个概念。侵蚀学坡长在两种情况下被截断:①当坡度较大幅度变缓以至于发生沉

积时,坡长截断并重新开始,称为坡度截断参数;②清晰可辨的沟道或河网处,坡面漫流结束,因而计算终止,称为沟道截断。

由于流域尺度上坡长提取较困难,Moore 等^[5]、Desmet 等^[6]、Winchell 等^[7]、晋蓓等^[8]和张照录^[9]先后通过单位汇水面积替换或径流线换算的方法代替坡长进而求得地形因子,这些方法最大的不足在于没有考虑截断问题,无法研究截断参数对侵蚀学坡长的影响^[7]。部分学者尝试从坡长的理论定义出发,在坡长提取过程中考虑起点和终点,获取更加精准的坡长,进而更加精确地估算侵蚀^[2,10-15],这些研究一般是考虑在坡度大于 5% (约 2.86°)时,坡度下降幅度超过上坡坡度的 50% ,或者坡度小于 5% 时,坡度下降幅度超过上坡坡度的 70% ,沉积出现,从而成为上坡累计计算和下坡坡长开始的位置,即坡长的截断点。有关径流长度的误差研究已有报道^[16-17],而在流域尺度上,坡度变化对侵蚀学坡长的影响如何以及不同截断值的设定会对提取结果带来怎样的变

收稿日期:2017-08-25

项目资助:国家自然科学基金(41771315,41301283,41371274,41301507);国家重点研发计划(2017YFC0403203);欧盟地平线 2020 研究与创新计划(635750);黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金(A314021402-1702);陕西省自然科学基金(2015JM4142,2016JM6038);中央高校基本科研业务费(2452015060)。

第一作者:张宏鸣,博士,教授,主要从事空间数据管理、区域土壤侵蚀评价和数字地形分析研究。zhm@nwsuaf.edu.cn

通讯作者:杨勤科,博士,研究员。caqiyang@nwsuaf.edu.cn

Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

化,一直是土壤侵蚀研究者关注的问题,但还未见报道。

本文利用构建的数学曲面和实际流域,分别设定不同的截断条件,对坡度变化引起的截断影响进行分析,旨在为区域尺度提取侵蚀学坡长、地形因子提供参考。为描述方便,本文将分布式侵蚀学坡长均简称为坡长。

1 坡长截断影响的研究方法

1.1 坡长提取算法

一般意义上,沿坡度线方向,由径流起点向下任一点,其轨迹在平面的投影为坡长。如果用于计算坡长的数据为数字高程模型(digital elevation model, DEM),则坡长与所对应单元格的等高线垂直且相等;如果 DEM 分辨率足够高,则可认为格网内等高线长度值与该点坡长值相等,但方向垂直。基于此,坡长计算公式可表示为^[13]:

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

式中, λ_{x_i, y_j} 为坐标点 (x_i, y_j) 处的坡长;积分下限 (x_0, y_0) 和上限 (x_i, y_j) 分别为径流源点和终点 (i, j 为对应的坐标位置); λ_c 为单元坡长。根据格网的特性,式(1)可被简写为:

$$\lambda_{x_i, y_j} = \sum_{x=0, y=0}^{x=i, y=j} \sum_{m=1}^8 k \cdot C \quad (2)$$

式中, C 为栅格边长; k 为单元坡长系数,用于计算单元坡长(由坡向决定); m 为单元格编号。

因此分布式侵蚀学坡长可由以下步骤计算完

$$z = \begin{cases} 1\ 579 - 10\sqrt{0.2(x/40)^2 + x/20}, & x \in [0, 400] \text{ m} \\ -0.9(x/40)^2 + x/20 + 1\ 585, & x \in (400, 800] \text{ m} \\ 1\ 561 - \sqrt{x^2/6 - 10x} + 18, & x \in (800, 1\ 000] \text{ m} \\ 1\ 189 - 8.3\sqrt{x - 1\ 000}, & x \in (1\ 000, 1\ 400] \text{ m} \\ -0.4(x/40 - 34)^2 + x/40 + 988, & x \in (1\ 400, 1\ 860] \text{ m} \\ -2.2(x/40 - 40)^2 + x/200 + 1\ 057, & x \in (1\ 860, 2\ 000] \text{ m} \end{cases} \quad (3)$$

式中, z 为曲面高程; $x \in [0, 2\ 000] \text{ m}$; $z \in [845, 1\ 579] \text{ m}$ 。高程分布情况见图 1(b),坡度分布情况见图 2(c),最大坡度为 78.37° ,平均坡度为 18.74° 。当 $x \in [0, 400] \text{ m}$ 时,坡度变缓;当 $x \in (400, 800] \text{ m}$ 时,坡度增加;当 $x \in (800, 1\ 000] \text{ m}$ 时,坡度衰减;当 $x \in (1\ 000, 1\ 400] \text{ m}$ 时,坡度减小;当 $x \in (1\ 400, 1\ 860] \text{ m}$ 时,坡度逐渐变陡;当 $x \in (1\ 860, 2\ 000] \text{ m}$ 时,坡度变缓。

2) 试验数据 2: 县南沟 DEM, 用于检验存在沟道的情况下,只考虑坡度截断对坡长的影响。

成:①DEM 无值点修复及洼地处理;②获取坡度和坡向(水流方向),生成坡度和坡向数组;③依据坡向数据,计算每一个栅格长度,即单元坡长;采用 D8 算法^[13],如果该栅格单元的坡向是东、南、西、北,则 $k=1$, C 为栅格长度;如果是东南、东北、西南、西北,则 $k=1.414$;④遍历步骤③产生的坡度和坡向数组,如果当前栅格满足截断条件,则该点为坡度截断点;⑤提取坡长,沿着水流方向,累计单元坡长,遇到截断点,停止累计,同时作为新坡长的起点,开始新坡长的累计。本文在前期研究的基础上,只考虑坡度变化的截断作用,使用 C# 语言开发了本文研究的测试工具(简称为 LS_TOOL)^[18]。

1.2 实验样区及结果分析方法

为了方便分析和理解并充分考虑坡度变化过程,本文研究采用了两个试验样例。

1) 试验数据 1: 数学曲面。模仿黄土高原高程及坡度变化,将 5 段不同变化规律的抛物曲线连接成投影距离为 $2\ 000 \text{ m}$ 长、 500 m 宽的坡面(图 1(a)),其中包含根据两个坡度变化的位置,分别是坡度大于或等于 2.86° (约占 94.5%)时的坡度变化以及坡度小于 2.86° (约占 5.5%)时的坡度变化位置。根据 McCool 等的建议^[19],地形因子的计算应该在 0.7 m 间距的地形图中生成,能够与实际地形相符,因此该数学曲面采用的分辨率为 0.5 m 。该数据不存在汇水,不受沟道的影响,适合于独立验证坡度变化引起的截断对坡长的影响。通过 Matlab 生成分辨率为 0.5 m 的数学曲面,计算公式为:

该流域地处黄土高原中部(见图 1(d)),面积约 44.85 km^2 ,属典型黄土丘陵沟壑区,地形破碎复杂,高程和坡度变幅较大,比较适合用作地形指标提取算法的测试。DEM 数据是基于 $1:1$ 万数字地形图(包括等高线、高程点和河流),在 ANU-DEM 软件下生成(见图 1(e)),分辨率为 2.5 m 。 $1:1$ 万数字地形图由国家基础地理信息中心提供,等高距为 5 m ,符合 CH/T 1015.1-2007 测绘标准^[20]。坡度小于 2.86° 的区域占 0.66% ,主要集中在沟谷处;坡度在 $20^\circ \sim 40^\circ$ 之间的区域占 58.97% 。

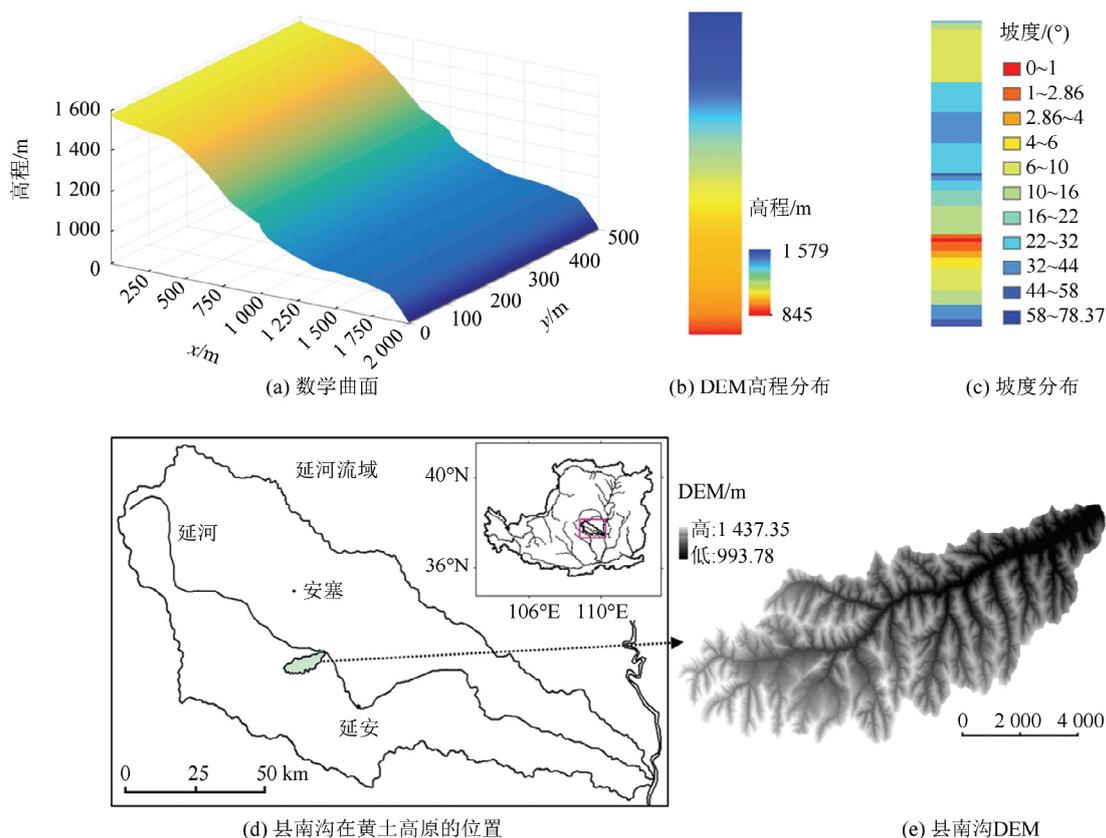


图 1 理想数学曲面及实地 DEM 样区

Fig.1 Ideal Mathematical Surface and Real DEM Data for Experiment

依据文献[18],以 2.86°为坡度变化点,分别进行测试。①坡度大于或等于 2.86°,将下坡坡度变化的百分比(R_1)按照 10%的比例递增,从 0 增至 1.00(对于坡度小于 2.86°的位置,截断值设置为 1,即不计算其截断);②坡度小于 2.86°,将下坡坡度变化的百分比(R_2)按照 10%的比例递增,从 0 增至 1.00(对于坡度大于或等于 2.86°的截断值设置为 1,即不计算其截断);③ R_1 、 R_2 同时变化对平均坡长、最大坡长的影响。为了检验不同情况下的坡度截断影响情况,分别将 R_1 和 R_2 作为输入因子,以平均坡长和最大坡长作为输出结果,采用 Canoco 5 软件中的主成分分析(principal component analysis,PCA)进行评估^[21]。PCA 方法通过线性变换将原始数据变换为一组各维度线性无关的表示,可用于表示各特征分量的相关关系,在 Canoco 软件中,显示结果无量纲。

2 坡长截断结果及影响分析

2.1 截断参数 R_1 对坡长提取结果的影响

1)对于数学曲面,在不同截断情况下,坡长分布情况如图 2 所示。由图 2 可以看出:①当 $R_1 = 0$ (见图 2(a)),下坡坡度变小时,坡长截断;当下坡

坡度表现为增大时,没有出现截断位置,坡长累计增长,结果符合坡度变化截断的定义,当坡度减小到一定程度时,坡面侵蚀过程主要表现为沉积,坡长截断。②随着 R_1 增加,坡度截断位置逐渐减少(见图 2(a)~2(f))。由于 R_1 变大,当坡度下降比例较大时,坡长截断,坡度变化的位置随着 R_1 的增加逐渐减少,截断点减少,坡长增加。③当 $R_1 = 1.0$ 时,即下坡坡度变为零,在该曲面中只有边界处的坡度变化达到 100%,因此坡长累计过程未出现截断(图 2(f))。

不同截断情况下,坡长平均值与 R_1 的关系说明:①随着 R_1 增加,截断位置减少,坡长平均值增大,由 75.69 m($R_1 = 0$)增至 999.98 m($R_1 = 1.0$)。②当 $R_1 < 0.5$ 时,坡长增大缓慢;当 $R_1 > 0.5$ 时,坡长增大明显。③最大和最小 R_1 值导致的坡长变化约为 92.43%。 R_1 与坡长 λ 的关系可表达为如下的多元回归式:

$$\lambda = 1\ 237.1R_1^2 - 566.6R_1 + 190.83 \quad (4)$$

2)对于县南沟,为方便说明问题,截取部分区域(包括坡面、沟谷),坡长分布情况见图 3,参考坡度分布见图 3(a)。由图 3 可以看出:①在坡度截断 $R_1 = 0$ 时,下坡坡度变小的位置均出现截断(图 3(b)中的红色区域),坡度小于 2.86°的位置

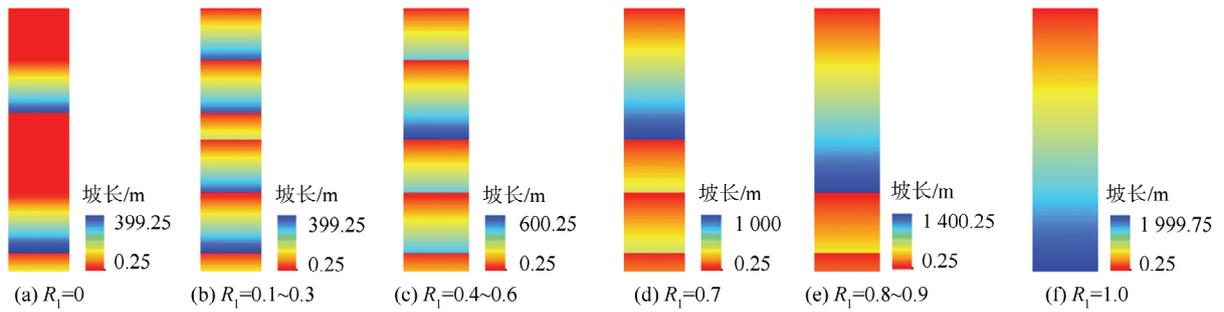


图2 R_1 对坡长截断的影响结果(数学曲面)

Fig.2 Slope Length Calculation Results of Mathematical Surface Under Different R_1

多集中在沟谷处,坡度大于或等于 2.86° 的位置多集中在坡面处,因此沟谷处可见连续的坡长(蓝线),坡面位置多截断。坡度增大的位置,坡长继续累计,因此部分区域坡长呈现增长趋势(图3(b)中的黄色区域)。

随着 R_1 的增加,坡度变化达到该值的位置逐渐变少,因此截断点随之减少。从图3(b)至图3(d),短坡长(红色)减少,长坡长(黄、蓝)增多。

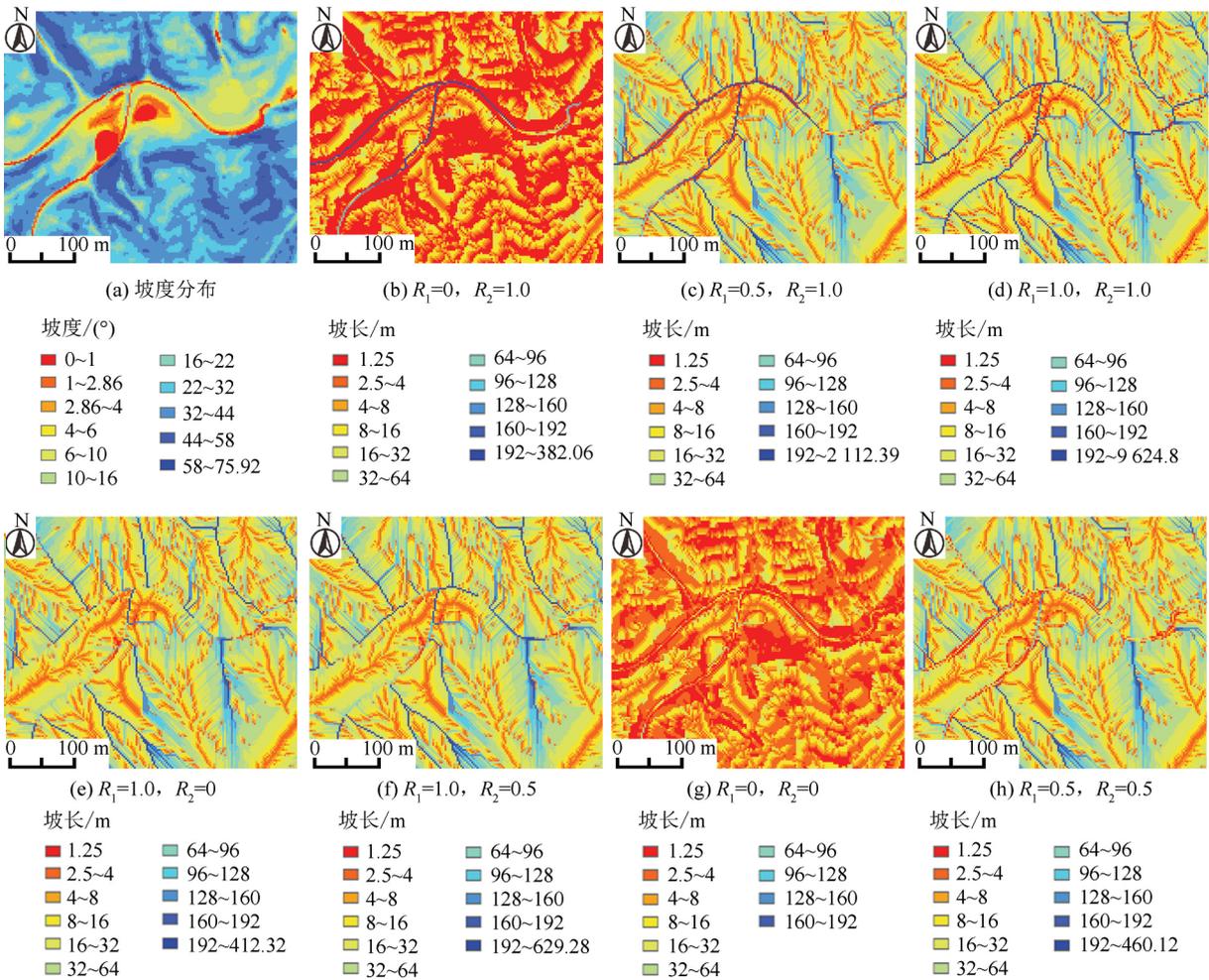


图3 不同 R_1 和 R_2 对坡长截断的影响结果(县南沟)

Fig.3 Slope Length Calculation Results of Xiannangou Catchment Under Different R_1 and R_2

对于县南沟流域,在不同截断情况下,由坡长平均值与截断比例 R_1 的关系说明:①随着 R_1 增加,截断位置减少,因此平均坡长增加,由 7.83 m ($R_1=0$) 增至 43.13 m ($R_1=1.0$)。

②当 $R_1 < 0.4$ 时,平均坡长增加显著;当 $R_1 > 0.4$ 时,坡长增长缓慢;在 $R_1 = 0.5$ 前后,坡长变化缓慢。

$$\lambda = 37.081R_1^2 + 67.763R_1 + 10.309 \quad (5)$$

与数学曲面不同,由于实际地形的坡度变化较数学曲面复杂,因此研究区的坡长随不同 R_1 的变化而变化。

2.2 截断参数 R_2 对坡长提取结果的影响

1)对于数学曲面,坡度小于 2.86° 且出现坡度衰减的情况,只出现在 x 坐标为 1 400~1 500 m 的位置(图 1(c)中的红色区域)。不同截断条件下,坡长分布情况如图 4 所示。由图 4 可以看出:①在 $R_2=0\sim 0.9$ 之间,坡度变化导致坡长截断,但由于该范围的坡度位置较短,主要集中在 x 坐标为 1 400~1 500 m 之间(图 4(a)、图 4(b)),坡长截断作用不如 R_1 明显。②不同截断情况下,统计坡长平均值与截断比例 R_2 的关系。由于数学曲面的特殊性,坡度截断值 R_2 在 $0\sim 0.5$ 之间,坡长变化较明显,平均坡长从 531.49 m 增加为 552.53 m; R_2 在 $0.5\sim 1.0$ 之间,坡长基本无变化,这主要是由于坡度变化从 2.86° 降至 0.30° ,变化范围小且距离短,因此 R_2 的变化对坡长截断效果不显著(图 4(c))。③最大和最小 R_2 值导致的坡长变化约为 53.15%。 R_2 与坡长 λ 的关系可表达为如下的多元回归式:

$$\lambda = -298.01R_2^2 + 918.95R_2 + 439.14 \quad (6)$$

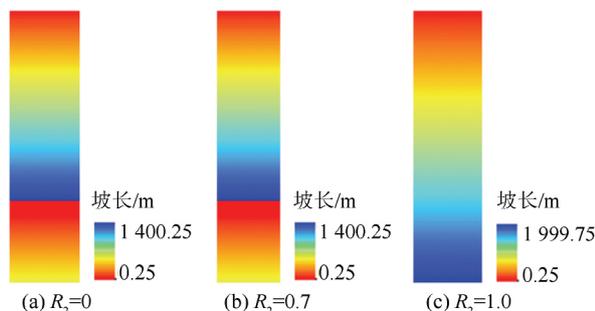


图 4 R_2 对坡长截断的影响结果(数学曲面)

Fig.4 Slope Length Calculation Results of Mathematical Surface Under Different R_2

2)对于县南沟,截取与坡度大于或等于 2.86° 一致的位置进行对比,结果发现:①坡度小于 2.86° 的位置主要集中于沟谷处(图 3(a)),因此随着 R_2 的增加,坡度截断的位置逐渐减少,沟道处的坡长逐渐连续(图 3(d)、图 3(e)、图 3(f))。对于县南沟流域, R_2 和 R_1 的截断效果互补, R_1 的截断位置主要集中在坡面, R_2 的截断位置主要集中在沟谷。② R_2 导致的坡长总变化约为 17.08%,相对于 R_1 对平均坡长的影响, R_2 的影响较低,主要原因在于:小于 2.86° 的坡度点较少,且集中于沟谷,导致 R_2 对平均坡长的影响较小。坡长 λ 与

R_2 的关系表达为如下的多元回归式:

$$\lambda = 8.59R_2^2 - 2.78R_2 + 36.302 \quad (7)$$

2.3 R_1 、 R_2 对坡长提取结果的综合影响

1)对于数学曲面,将不同截断值(R_1 、 R_2)所对应的平均坡长作曲面图(图 5(a))。其中, R_1 为坡度小于 2.86° 变化率的截断值, R_2 为坡度大于或等于 2.86° 变化率的截断值。随着 R_1 和 R_2 的增加,坡度变化引起截断的比例减少,平均坡长增长。当 $R_1=0$ 、 $R_2=0$ 时,平均坡长最短;当 $R_1>0.6$ 、 $R_2>0.5$ 时,坡长增加迅速。但数学曲面坡面变化平稳,因此并不是所有 R_1 、 R_2 都出现截断。

2)对于县南沟,将不同截断值(R_1 、 R_2)所对应的平均坡长作曲面图(图 5(b))。与数学曲面类似,随着 R_1 和 R_2 的增加,坡度变化引起截断的比例减少,平均坡长增长。当 $R_1=0$ 且 $R_2=0$ 时,坡度下降的位置均表现为截断(图 3(g)),平均坡长最短;当 $R_1=1.0$ 、 $R_2=1.0$ 时,无坡度截断(图 3(d)),坡长一直累计,因此平均坡长最长;当 R_1 、 R_2 介于 $0\sim 1.0$ 之间时,对比图 3(b)至图 3(h),由于实际地形变化起伏较规律,坡度分布更加均匀,因此平均坡长随截断值(R_1 、 R_2)的变化更加均匀。

3)统计数学曲面和县南沟两个测试数据的坡长最大值与 R_1 、 R_2 的关系(图 5(c)),最大值的变化过程与平均值类似,当 $R_1>0.7$ 、 $R_2>0.5$ 时,坡长增加迅速,这与前人研究^[3,10]将坡度截断分别设置为 0.5 和 0.7 的结果基本吻合。

4)县南沟 PCA 分析结果如图 6 所示(结果无量纲)。图 6(a)中,坡长与 R_1 、 R_2 箭头同向,表明正相关,即随着 R_1 、 R_2 的增大,坡长平均值亦增长;同时在坐标轴上的投影长度 $R_1>R_2$,表明 R_1 对平均坡长的作用大于 R_2 对平均坡长的作用。图 6(b)中,最大坡长与 R_1 、 R_2 箭头同向,表明正相关,即随着 R_1 、 R_2 的增大,坡长最大值增长;同时在坐标轴上的投影长度 $R_2>R_1$,表明 R_2 对最大坡长的作用大于 R_1 对最大坡长的作用。该结果可以理解为:① R_1 和 R_2 值的增加导致坡度变化增大才能截断,因此无论是平均坡长还是最大坡长都会增大;②由于样地坡度分布的原因, R_2 的作用主要集中在坡面, R_1 的作用集中在沟道, R_2 导致坡长累计过程截断,而坡面汇集到沟道处,坡长增加显著,但沟道单元格数量远小于坡面单元格数量,即使坡长增加显著,但由于较多的单元格坡长值较小,所以导致了 R_2 对平均坡长的影响大,但坡长最大值随着 R_1 的变大,增长较明显,

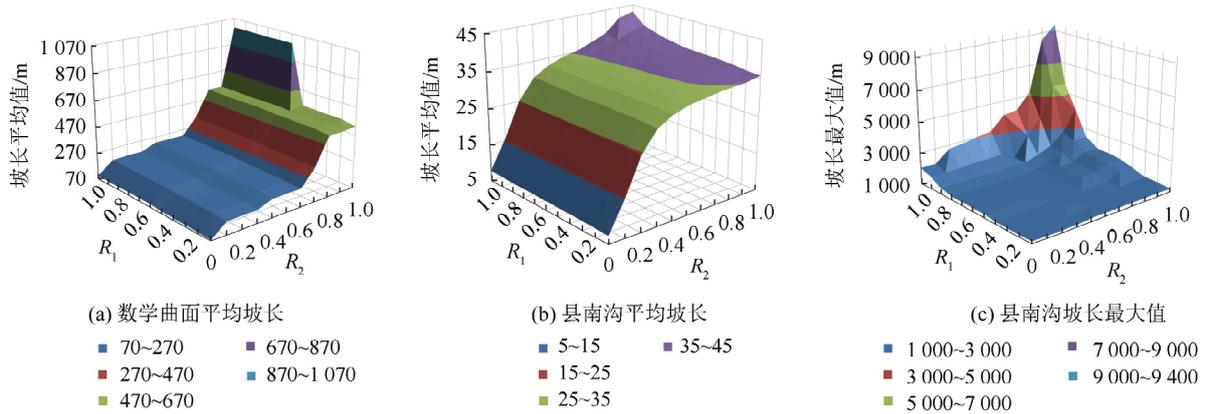


图5 不同 R_1 、 R_2 所对应的坡长结果

Fig.5 Effect of Average and Max Slope Length Under Different R_1 and R_2

因此 R_1 对坡长最大值的影响较大。该结果可以从图 5(b)、5(c)中看到,图 5(b)中,平均坡长沿 X 轴(R_1)方向的变化不如沿 Y 轴(R_2)方向的变化明显;图 5(c)中,最大坡长沿 X 轴(R_1)方向的变化比沿 Y 轴(R_2)方向的变化明显。③本文未将沟道截断考虑进来,如果考虑沟道截断,那么 R_1 对沟道的截断作用将可以忽略,因此黄土高原地区坡度小于 2.86° 的截断可以不予考虑。

不明显;②截断参数 R_1 和 R_2 越大,坡度截断点越密集,坡长截断越明显,平均坡长越短;③坡长增长的最大值统计规律与截断参数的经验设定有一定关联关系,初步建议黄土高原地区 R_1 设置为 0.7 , R_2 设置为 0.5 。但分布式侵蚀学坡长的截断因素有两个,本文研究了坡度截断,给出了坡长提取的变化情况及原因,沟道截断的影响结果需要进一步研究。同时,在不同分辨率下,截断参数该如何设置是侵蚀模型应用遇到的较棘手的问题之一,亟待进一步研究。坡长提取过程中的不确定性较多,尽管前人进行了算法、分辨率上的研究^[22],但综合截断参数、分辨率变化的研究还需尽快展开。

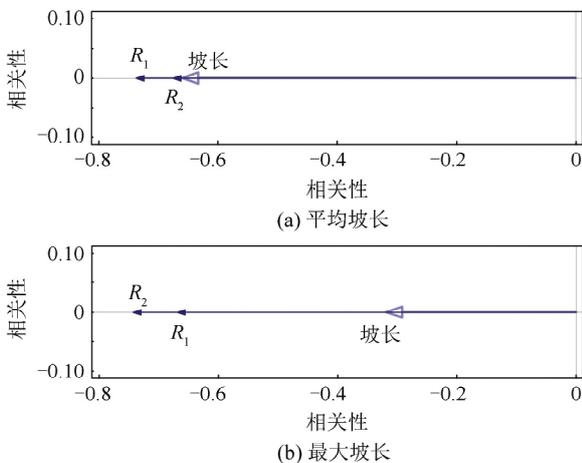


图6 不同 R_1 、 R_2 值对县南沟坡长平均值的 PCA
Fig.6 PCA of Average Slope Length of Xiannangou Catchment Under Different R_1 and R_2

3 结 语

本文对坡长的坡度截断进行测试与结果分析,得到如下结论:①由于研究区的坡度分布特性,截断参数 R_1 对坡长最大值的作用更大,截断参数 R_2 对坡长平均值的作用更大。在黄土高原地区, R_1 的作用主要集中在坡面上, R_2 的作用主要集中在沟谷处,且沟道截断使得 R_2 的作用效果

参 考 文 献

- [1] Yang Qinke, Guo Minghang, Li Zhiguang, et al. Extraction and Preliminary Analysis of Soil Erosion Terrain Factors in China[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2013(10): 17-21(杨勤科, 郭明航, 李智广, 等. 全国土壤侵蚀地形因子提取与初步分析[J]. *中国水土保持*, 2013(10): 17-21)
- [2] Hickey R. Slope Angle and Slope Length Solutions for GIS[J]. *Cartography*, 2000, 29(1): 1-8
- [3] Renard K G. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[M]. USA: United States Department of Agriculture, 1997
- [4] Liu B Y, Zhang K L, Xie Y. An Empirical Soil Loss Equation[C]. The 12th International Soil Conservation Organization Conference, Beijing, China, 2002
- [5] Moore I D, Wilson J P. Length-Slope Factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified Method of Estimation[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 1992, 46(6): 31-35

- Water Conservation*, 1992, 47(5): 423-428
- [6] Desmet P J J, Govers G. A GIS Procedure for the Automated Calculation of the USLE LS Factor on Topographically Complex Landscape Units [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1996, 51(5): 427-433
- [7] Winchell M F, Jackson S H, Wadley A M, et al. Extension and Validation of a Geographic Information System-Based Method for Calculating the Revised Universal Soil Loss Equation Length-Slope Factor for Erosion Risk Assessments in Large Watersheds[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 63(3): 105-111
- [8] Jin Bei, Liu Xuejun, Zhen Yan, et al. Analysis of Slope Length Extracted from Grid-Based Digital Elevation Model in ArcGIS Environment[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2010, 12(5): 700-706(晋蓓, 刘学军, 甄艳, 等. ArcGIS 环境下 DEM 的坡长计算与误差分析[J]. *地球信息科学学报*, 2010, 12(5): 700-706)
- [9] Zhang Zhaolu. The Algorithm Design and Optimization for Topographic Factors of Universal Soil Loss Equation Based on DEM[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(3): 203-205(张照录. 基于 DEM 通用土壤流失方程地形因子的算法设计与优化[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(3): 203-205)
- [10] 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): 1 043-1 053
- [11] Luo Hong, Ma Youxin, Liu Wenjun, et al. Estimation of Topographical Factors in Revised Universal Soil Loss Model Based on Maximum up Stream Flow Path[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(5): 1 185-1 189(罗红, 马友鑫, 刘文俊, 等. 采用最大溯源径流路径法估算 RUSLE 模型中地形因子探讨[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(5): 1 185-1 189)
- [12] Zhang Hongming, Yang Qinke, Li Rui, et al. Research on the Estimation of Slope Length in Distributed Watershed Erosion[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(4): 437-444(张宏鸣, 杨勤科, 李锐, 等. 流域分布式侵蚀学坡长的估算方法研究[J]. *水利学报*, 2012, 43(4): 437-444)
- [13] Zhang H, Yang Q, Li R, et al. Extension of a GIS Procedure for Calculating the RUSLE Equation LS Factor[J]. *Computers & Geosciences*, 2013, 52(1): 177-188
- [14] Yang X H. Digital Mapping of RUSLE Slope Length and Steepness Factor Across New South Wales, Australia[J]. *Soil Research*, 2015, 53(2): 216-225
- [15] Zhang H, Yao Z, Yang Q, et al. An Integrated Algorithm to Evaluate Flow Direction and Flow Accumulation in Flat Regions of Hydrologically Corrected DEMs[J]. *Catena*, 2017, 151: 174-181
- [16] Liu Xuejun, Jin Bei, Hu Jiabei, et al. Quantitative Analysis of Error in Extracting Flow Length from Grid-Based Digital Elevation Model[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(7): 757-761, 779(刘学军, 晋蓓, 胡加佩, 等. 格网 DEM 上径流长度计算误差的定量分析[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2012, 37(7): 757-761, 779)
- [17] Orlandini S, Moretti G, Gavioli A. Analytical Basis for Determining Slope Lines in Grid Digital Elevation Models[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(1): 526-539
- [18] Zhang H, Wei J, Yang Q, et al. An Improved Method for Calculating Slope Length (λ) and the LS Parameters of the Revised Universal Soil Loss Equation for Large Watersheds [J]. *Geoderma*, 2017, 308: 36-45
- [19] McCool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised Slope Steepness Factor for the Universal Soil Loss Equation[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1987, 30(5): 1 387-1 396
- [20] The State Bureau of Surveying and Mapping. CH/T 1015.1-2007 Technical Rules for Producing Digital Products of 1:10 000 1:50 000 Fundamental Geographic Information Part 1: Digital Line Graphs (DLG) [S]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2007(国家测绘局. CH/T 1015.1-2007 基础地理信息数字产品 1:10 000 1:50 000 生产技术规程第 1 部分:数字线划图(DLG) [S]. 北京:测绘出版社, 2007)
- [21] Lepš J, Šmilauer P. Multivariate Analysis of Ecological Data Using Canoco 5 [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2014
- [22] Zhang Hongming, Song Zelu, Yang Jiangtao, et al. Influence of DEM Super-Resolution Reconstruction on Terraced Field Slope Extraction [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(1): 112-118(张宏鸣, 宋泽鲁, 杨江涛, 等. DEM 超分辨率重构对梯田坡度提取的影响研究[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(1): 112-

Effect of Slope Cutoff in Extraction of Distributed Soil Erosion Slope Length

ZHANG Hongming¹ WANG Meng¹ YANG Qinke² JIN Bei¹ WANG Meili¹ LI Rui^{1,3}

¹ Northwest A&F University, Yangling 712100, China

² Department of Urbanology and Resource Science, Northwest University, Xi'an 710069, China

³ Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

Abstract: Topography is an important factor affecting soil erosion. Distributed soil erosion slope length is an important parameter of topographic factor. The slope length agree with the process of soil erosion, is calculated with the cutoff considered. Slope length, influenced by the terrain, especially the slope changes affects the extraction results are in urgent need of research. In this paper, the mathematical surface and the digital elevation model of the Xiannangou catchment in the Loess Plateau are used as the data source. The length of the slope is extracted by using the LS_TOOL method, and the slope length cutoff results caused by the change in slope are compared and analyzed by principal component analysis. The results show that the greater the down slop decrease, the more obvious the slope cutoff effect. The cutoff factor R_1 and cutoff factor R_2 have positively correlated with the maximum slope length and averages slope length; as there are more steep slopes and channels in the Loess Plateau region, the influence of R_1 is less than that of R_2 . When the slope setting of the slope is larger than that of $R_1 > 0.7$ and $R_2 > 0.5$, the change of slope length is obvious. It is suggested that the slope cutoff setting of the slope length of the Loess Plateau region should be $R_1 = 0.7$ and $R_2 = 0.5$.

Key words: soil erosion; universal soil loss equation; topographic factors; erosion slope length; slope cutoff parameter

First author: ZHANG Hongming, PhD, professor, specializes in spatial data management, regional soil erosion evaluation and digital terrain analysis. E-mail: zhm@nwsuaf.edu.cn

Corresponding author: YANG Qinke, PhD, professor. E-mail: qkyang@nwu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41771315, 41301283, 41371274, 41301507; the National Key Research and Development Program of China, No. 2017YFC0403203; EU Horizon 2020 Research and Innovation Programme, No. 635750; Funded by State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, No.A314021402-1702; the Natural Science Foundation of Shanxi Province, Nos. 2015JM4142, 2016JM6038; the Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 2452015060.