

# 基于不同分辨率 DEM 提取坡长的统计分布

郭伟玲<sup>1</sup>, 樊宇<sup>1</sup>, 杨勤科<sup>2</sup>

(1. 安徽理工大学 测绘学院, 安徽 淮南 232001; 2. 西北大学 城市与资源环境学院, 西安 710127)

**摘要:**坡长是土壤侵蚀和流域水文等研究的重要地形指标,在流域或区域土壤侵蚀评价研究中,坡长通常基于中低分辨率 DEM 提取,但随着 DEM 分辨率的降低,其上提取的坡长发生扩张,进而影响土壤侵蚀评价的计算精度。DEM 分辨率对坡长的影响虽已受到注意,但对于这种影响的机理尚不清楚。因此本研究采用对坡长表面采用分级研究的方法,分析了坡长随 DEM 分辨率的统计分布变化的规律。结果表明:随着分辨率的降低,整体上表现为短坡长向中等坡长区扩张,长坡长出现衰减,坡长整体集中分布在中等坡长区域,基于此提出了因分辨率降低引起坡长表面变化的定量表述公式及坡长误差经验公式,可以根据坡长提取精度需求来计算合适的分辨率参数,为选取合适的 DEM 分辨率提高坡长计算效率提供依据。

**关键词:**坡长; 数字高程模型; 空间分辨率; 误差经验公式

中图分类号:P283.1; S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)03-0072-05

## Statistical Distribution of Slope Length Derived from DEM With Different Spatial Resolutions

GUO Weiling<sup>1</sup>, FAN Yu<sup>1</sup>, YANG Qinke<sup>2</sup>

(1. School of Geomatics, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China;

2. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China)

**Abstract:** Slope length is an important terrain factor in the research of soil erosion and watershed hydrology, etc. In the research of soil erosion assessment at watershed or regional scale, slope length is normally extracted from coarser resolution DEMs. However, slope length tends to increase as resolution becomes coarser, which makes the accuracy of hydrology and soil erosion model declined. At present, effects of DEM resolution on slope length has been received attention, but the mechanism for these effects is unclear. Based on this, we used the method of grading the surface of slope length to analyze the statistical distribution of slope length changes with DEM spatial resolution. The results showed that with the resolution decreasing the slope length classification surface presented different trends, the overall performance was that the short slope length grade expanded to the medium grade area, the high grade slope length appeared attenuating and the slope length centrally distributed in the medium grade area. Based on this, the quantitative expression of the slope length surface changes caused by the resolution reduction was proposed. The formula and the empirical formula of slope length error may calculate the appropriate resolution parameters according to the requirement of the slope length extraction precision, and provide the basis for selecting the appropriate DEM resolution to improve the calculation efficiency.

**Keywords:** slope length; DEM; spatial resolution; empirical formula of error

分布式侵蚀学坡长(简称坡长)<sup>[1]</sup>是指在土壤侵蚀过程中具有累积和截断特征的坡长,该坡长通常在两种情况下截断:一是在坡度大幅度变缓而发生沉积时,称为坡度截断;二是在清晰可辨的沟道或者河网

处坡面漫流结束而发生截断,称为沟道截断<sup>[2]</sup>。这一概念在土壤侵蚀研究中被广泛使用<sup>[3-5]</sup>。

不同分辨率的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)多基于相应比例尺地形图插值生成<sup>[6]</sup>,

目前主要是通过不同的数据采集方式,得到不同分辨率;如三维激光扫描得到亚米级、Lidar 得到米级等。因此地形图的制图综合、采集方式以及数据组织方式<sup>[7]</sup>、DEM 内插方法<sup>[8]</sup>等因素无疑会影响到基于 DEM 提取的地形因子如侵蚀学坡长的精度<sup>[9]</sup>,并存在着复杂的不确定性<sup>[10]</sup>。此外流向算法、数据边界、坡长截断方式等,都影响着坡长提取的结果。

坡度和坡长是影响土壤侵蚀的最主要地形因子,也是水土流失评价中的重要指标。陈楠<sup>[11]</sup>、汤国安<sup>[12]</sup>、刘红艳<sup>[13]</sup>、王春梅<sup>[14]</sup>等许多学者对坡度与 DEM 分辨率之间的关系进行了一系列研究。郭伟玲等<sup>[15]</sup>和王程等<sup>[16]</sup>的研究表明随着 DEM 分辨率的增加,许多地形细节被概括,DEM 将逐渐不能表达真实地表起伏情况,其上提取的坡度值变小,坡长值增大。秦伟等在坡长因子研究进展中对坡长因子研究提出了展望,其中包括提取算法、地貌地形、DEM 分辨率等因素对坡长提取的影响<sup>[17]</sup>。关于坡长提取结果随分辨率变化的研究相对较少,坡长同样是影响土壤侵蚀的另一重要地形因素<sup>[18]</sup>,因此在水土保持研究工作中也迫切需要能够提供准确的坡长信息。

本研究基于前人的研究成果<sup>[15,19]</sup>,结合信息论和地统计学等理论<sup>[20]</sup>探讨侵蚀学坡长随 DEM 分辨率变化的规律并对其进行定量表述,以期为选取合适的 DEM 分辨率计算坡长提供技术支持。

本文以 1:10 000 比例尺地形图生成的 2.5 m 分辨率 DEM 所提取的坡长为真值,对比不同分辨率 DEM 上提取的坡长与真值的误差并观察分级坡长区随分辨率变化的规律,计算误差与分辨率之间的数学关系,总结经验公式,并将经验公式在检验样区进行检验。研究将为水土保持工作中选取合适的 DEM 分辨率提供科学依据。

# 1 研究方法

## 1.1 研究样区与数据源

本研究选用两个研究样区,试验样区位于陕西省安塞县县南沟流域,检验样区位于陕西省绥德县韭园沟流域。两个研究样区均为地形变化复杂、水土流失严重的黄土丘陵沟壑区,这里沟壑纵横,地貌变化起伏无常,是土壤侵蚀较为严重的区域,也是水土保持研究工作的重点区域,图 1 为研究区的 DEM 示意图。

两个样区的数据均采用由国家测绘部门编制的 1:10 000 比例尺的数字线画图(Digital Line Graphic,DLG,等高距均为 5 m)经过必要的查错、编辑处理后作为本研究的数据源。

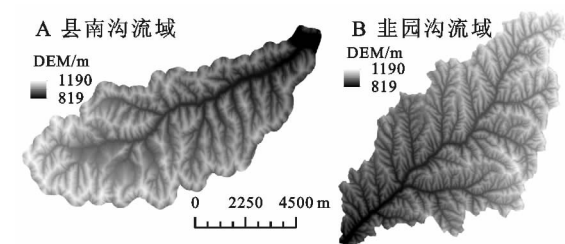


图 1 研究区 DEM

## 1.2 多尺度 DEM 生成及坡长提取方法

计算分布式侵蚀学坡长时,主要有单流向和多流向两种流向算法可供选择。单流向算法以单个格网单元为中心向周围流出,共有 8 个水流方向(即正方形的对角线和中线方向),但该格网单元的水流只能流入与之相邻的一个格网单元,而不分配流量。考虑到水流的发散性,给定格网单元的水流应该是结合坡度、坡向等因素分配流量后流入相邻的多个格网单元,所以本研究计算侵蚀学坡长采用基于坡度的多流向算法 MS<sup>[21]</sup>。

本文使用 1:10 000 比例尺 DLG 数据作为建立 DEM 的基本信息源,经专业 DEM 插值软件 ANUDEM<sup>[22]</sup>多次插值生成 2.5 m(最佳分辨率)<sup>[23]</sup>和 10~200 m 间隔 10 m 的不同分辨率的 DEM 数据。再通过 LS\_TOOL 工具<sup>[24]</sup>分别对上述 DEM 数据提取多流向分布式土壤侵蚀学坡长。

## 1.3 坡长信息提取

基于统计学原理,结合之前的研究经验<sup>[25]</sup>,坡长表面的坡长值分布呈多态和偏态现象,不符合正态分布。本研究将 2.5 m 分辨率坡长图进行自然对数计算,使其符合正态分布,再将其进行等间距划分,共划分成 8 个区间。对区间阈值进行反函数计算使其转换成坡长值,据此来划分出 8 个坡长分级,分级方案见表 1。通过改变 DEM 分辨率,观察不同级别坡长面积占坡长总面积的比值随 DEM 分辨率变化规律。

表 1 坡长分级方案

| 级别 | 分级范围/m | 级别 | 分级范围/m    |
|----|--------|----|-----------|
| 1  | <4     | 5  | 162~546   |
| 2  | 4~14   | 6  | 546~1843  |
| 3  | 14~48  | 7  | 1843~6218 |
| 4  | 48~162 | 8  | >6218     |

# 2 结果与分析

## 2.1 DEM 分辨率对坡长的影响

研究应用 LS\_TOOL 软件<sup>[24]</sup>提取多流向土壤侵蚀学坡长,以研究区最佳分辨率 2.5 m 的 DEM 提取的坡长为基准值,结合研究特点制定分级方案(表 1)对 2.5 m 和 10~200 m 的坡长表面进行分级,计算得到不同坡长级别占坡长总面积的比率随分辨率变化趋势图(图 2)。

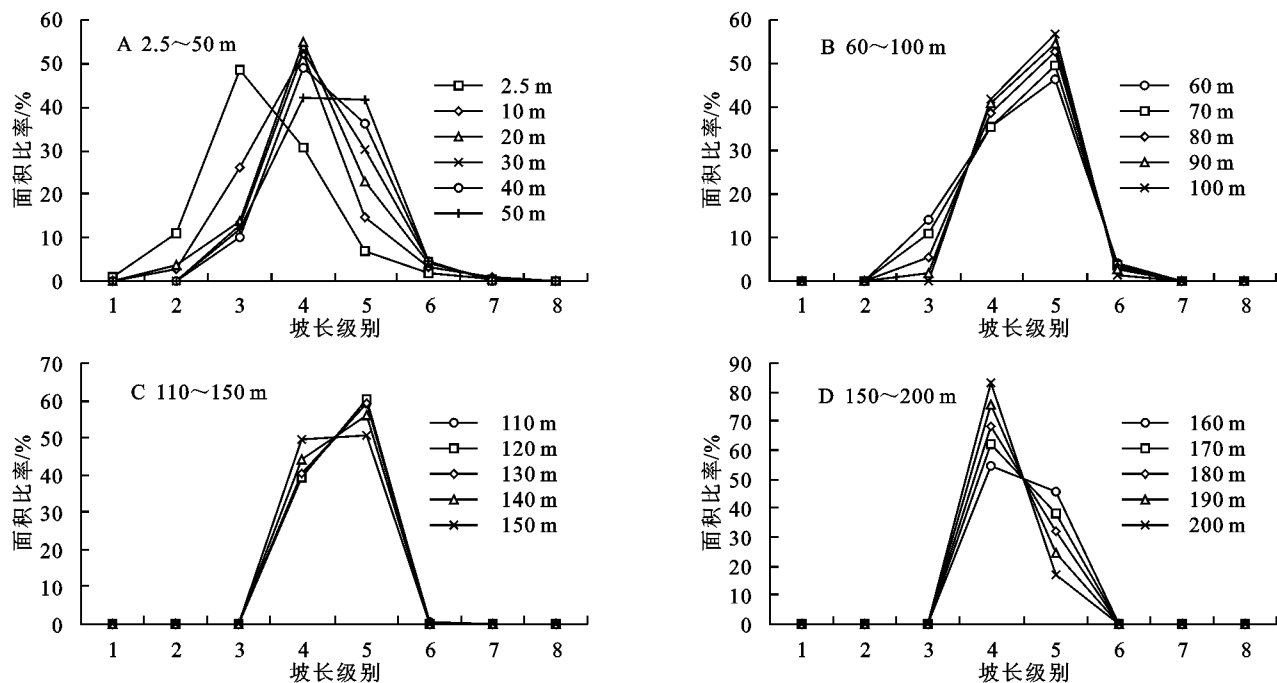


图 2 不同分辨率 DEM 提取坡长分级面积曲线对比

观察图 2 可以看出,坡长总体取值范围随着分辨率变粗而缩小,即值域变窄,坡长面积分布逐渐向第 4,5 级过渡并集中,对 2.5~150 m 的坡长最大表面积所在级别进行统计并计算众数,发现众数为 5,说明坡长表面积最终集中分布于第五级别范围内,尤其是分辨率大于 90 m 后。这说明随着 DEM 分辨率降低而产生制图综合作用,细小沟道被忽略,导致其上提取的短坡长合并变长,坡长值向较高级别区域扩张,短坡长面积比率逐渐趋于零,同时 6~8 级别坡长面积比率也呈现出相同的变化,到 100 m 分辨率时几乎为零。因此随着分辨率降低坡长面积比率曲线的峰值逐渐右移,呈现出 2.5~50 m 时向第 4 级别集中,60~140 m 向第 5 级别集中,对比图 2C 和 2D 可以发现分辨率 150~200 m 时峰值部分又向第 4 级别集中,当分辨率为 200 m 时第 4 级别面积比率达到 0.83,总体上坡长集中分布在 4,5 级别内。综上所述 DEM 分辨率对不同坡长级别的影响变化是不同的。

从图 2B 中还可以发现,坡长的 1~3 级别和 6~8 级别坡长衰减并向中等坡长区转化,导致 4~6 级别坡长所占面积的增加,其中短坡长部分的减少是由于坡长算法所导致的,坡长最小值基本为对应分辨率的一半,随着分辨率的降低坡长最小值必然变大,短坡长区也相应减少。可见分辨率的降低会造成短坡长区缩小并向中等坡长区延伸,长坡长区面积先增加后减少的现象。

将图 2 所对应的数据排列成每行为不同级别的坡长面积(1~8 级别,共 8 行),每列为不同分辨率(2.5~200 m,共 21 列),进行列与列之间的相关性

分析,得到相关系数矩阵,提取各分辨率与 2.5 m 分辨率坡长级别的相关系数,按顺序做成相关系数变化图,据此来说明各分辨率坡长分布特征与基准分辨率之间的变化相似性,见图 3。

从图中可以看出 120 m 分辨率是一个突变点,120 m 分辨率之前各分辨率坡长分布特征与基准分辨率的相关系数是下降的,之后略有上升。说明 120 m 分辨率下坡长分布特征变化与 2.5 m 相似性最低,变化较 2.5 m 有显著差异。

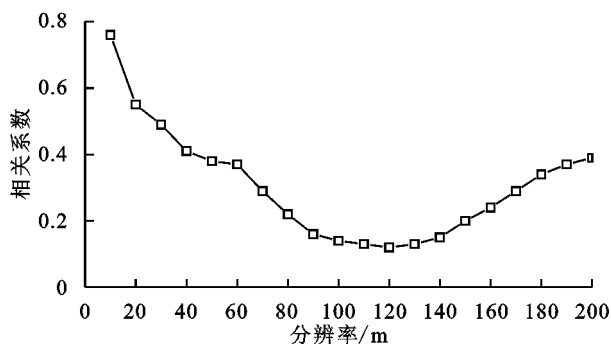


图 3 相关系数变化

从统计学指标和信息论中信息熵概念<sup>[17]</sup>来总体分析分辨率对坡长提取的影响,见表 2。

从表 2 可以看出,随着分辨率降低,坡长面积标准差总体上呈增大趋势,由此可见在分辨率降低过程中,即有效栅格尺寸增大,地表起伏被概括表达,坡长趋于扩张并且集中程度增加。标准峰度系数总体上随分辨率降低而增大,表明坡长面积比率曲线在低分辨率时要比高分辨率陡峭,分辨率在 50 m 和 150 m 时标准差分别出现一个低值,表明此时坡长分布集中

程度要低于相邻分辨率,结合图 2 可以发现 50 m 和 150 m 正是坡长面积比率开始向另一级集中的拐点,随后集中程度开始攀升,这说明分辨率对坡长分布的影响是分段变化的,坡长面积比率曲线总体上变的更加陡峭,比正态分布更加集中。从坡长表面信息熵来看,2.5 m 到 40 m 坡长表面信息熵是增大的,说明坡长表面随分辨率降低而变得更加离散。分辨率自 40 m 之后坡长表面信息熵呈现单调递减趋势,这是由于坡长分布趋于集中,短坡长区(1,2,3)和长坡长区(6,7,8)面积减少为零而引起的,与前述坡长面积曲线分析结果相互印证。

表 2 不同分辨率坡长表面统计信息

| 分辨率/m | 标准差  | 标准峰度系数 | 信息熵  |
|-------|------|--------|------|
| 2.5   | 0.18 | 1.59   | 5.17 |
| 10    | 0.18 | 2.76   | 5.72 |
| 20    | 0.19 | 4.03   | 5.88 |
| 30    | 0.19 | 2.01   | 5.94 |
| 40    | 0.19 | 0.60   | 5.96 |
| 50    | 0.19 | -0.31  | 5.95 |
| 60    | 0.18 | 0.16   | 5.92 |
| 70    | 0.19 | 0.75   | 5.88 |
| 80    | 0.21 | 0.80   | 5.81 |
| 90    | 0.22 | 0.73   | 5.75 |
| 100   | 0.23 | 0.85   | 5.66 |
| 110   | 0.24 | 1.29   | 5.54 |
| 120   | 0.24 | 1.49   | 5.44 |
| 130   | 0.24 | 1.22   | 5.31 |
| 140   | 0.23 | 0.50   | 5.16 |
| 150   | 0.23 | 0.01   | 5.03 |
| 160   | 0.23 | 0.30   | 4.88 |
| 170   | 0.24 | 1.82   | 4.68 |
| 180   | 0.25 | 3.62   | 4.51 |
| 190   | 0.27 | 5.58   | 4.34 |
| 200   | 0.29 | 6.98   | 4.13 |

对不同分辨率坡长信息熵进行拟合,得到公式(1):  
$$y = -0.00009x^2 + 0.01208x + 5.451 \quad R^2 = 0.9586$$

式中: $y$  为坡长信息熵; $x$  为 DEM 空间分辨率(m)。对(1)式两边求导则有:

$$y' = -0.00018x + 0.01208 \tag{2}$$

根据导数的定义可知  $y'$  即为 DEM 分辨率造成的坡长表面分布变化的定量表述,因此式(2)可以作为县南沟流域 1:10 000 比例尺下 DEM 分辨率对其提取坡长不确定影响的定量公式,用来衡量该比例尺下不同分辨率对坡长提取的不确定性影响程度。

2.2 坡长分布与 DEM 分辨率的函数关系

前面分析了不同坡长级别的面积变化特征,接下

来需要找出一个指标来衡量不同分辨率的坡长误差大小,并求出误差与分辨率的函数关系。通过该函数的反函数即可根据误差精度的需要来求得适宜的 DEM 分辨率参数,这对提取坡长时选择合适的 DEM 分辨率,避免分辨率选取的任意性,保证坡长提取精度需求等具有一定意义。

以不同分辨率中各级别坡长面积相对于最佳分辨率中对应级别的坡长面积差值绝对值作为坡长的绝对误差。随后将绝对误差除以 2.5 m 分辨率坡长表面积作为相对误差,再根据 2.5 m 坡长表面积进行加权得到加权总体误差。计算公式如下:

$$\beta = \sum_{i=1}^8 \left( \frac{p_i^r - p_i^{2.5}}{s} \right) \quad (r=10,20,30,\dots,200,i=1,2,\dots,8) \tag{3}$$

式中: $\beta$  为加权总体误差; $p$  为坡长面积,上标  $r$  表示分辨率,下标  $i$  表示坡长级别; $s$  为研究区总面积。

通过上述公式对试验数据计算结果见图 3。对图 3 中的拟合函数求其反函数则可以得到公式:

$$r = 10e^{4.72\beta^2 - 3.19} \tag{4}$$

式中: $r$  为 DEM 分辨率; $\beta$  为误差大小。这样我们就可以根据坡长提取精度要求,即坡长加权总体误差大小,通过公式(4)来求得适宜的 DEM 分辨率。

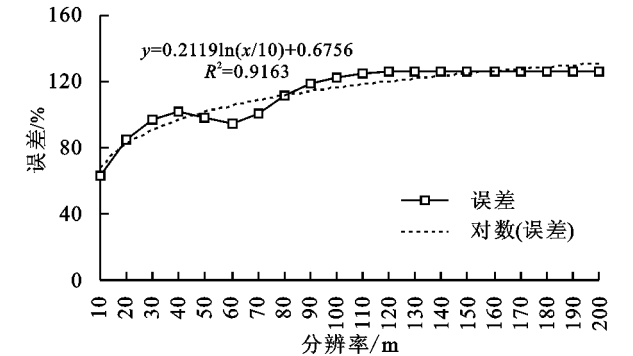


图 4 误差与分辨率关系

2.3 模型检验

选取陕西绥德韭园沟流域作为检验样区,取加权总体误差 0.5~1.5,根据公式(4)求得所需要的 DEM 分辨率,再根据求得的分辨率在检验样区建立相应的 DEM 并提取坡长,根据公式(3)计算实际加权总体误差,并求出所取误差与实际误差之间的绝对差值,见表 3。

表 3 说明根据实际工作需要控制选取误差,并利用公式(4)求得对应分辨率 DEM,在其上提取的坡长实际加权总体误差仍然非常接近公式计算中代入的选取误差  $\beta$ ,这表明此公式同样适用于其他黄土丘陵沟壑样区。

表 3 模型检验误差对照

| 误差<br>需求/% | 对应<br>分辨率/m | 实际加权<br>总体误差/% | 误差绝对<br>差值 |
|------------|-------------|----------------|------------|
| 30         | 2           | 31             | 1          |
| 50         | 4           | 49             | 1          |
| 70         | 11          | 74             | 4          |
| 90         | 29          | 96             | 6          |
| 110        | 74          | 120            | 10         |

### 3 结论

(1) DEM 空间分辨率降低会导致坡长分布情况变化,表现为不同分辨率对坡长各个分级区的影响是不同的,变化规律为短坡长区和长坡长区均减少并向中等坡长区集中。

随着分辨率降低,坡长趋于扩张并且集中程度增加,此外分辨率对坡长分布的影响是分段变化的。

(2) 本文通过试验得出了由 DEM 分辨率降低而导致坡长表面变化的定量表述公式。通过对不同分辨率提取坡长的误差计算,用加权总体误差这一指标来衡量不同分辨率的坡长误差大小,并得出其与 DEM 分辨率的函数关系,通过该函数的反函数即可根据误差精度的需要来求得适宜的 DEM 分辨率参数。通过试验样区检验该经验公式,效果良好。

由于检验样区同为黄土丘陵沟壑区且样本量较小,今后的研究还可以继续深化,如采用不同地貌类型区,不同范围的研究区来探索经验公式,也可以结合地形图比例尺,地貌差异等多种因素来探讨。

#### 参考文献:

- [1] 杨勤科,郭伟玲,张宏鸣,等. 基于 DEM 的流域坡度坡长因子计算方法研究初报[J]. 水土保持通报, 2010, 30(2): 203-206.
- [2] 张宏鸣,杨勤科,王猛,等. 沟道截断对分布式土壤侵蚀学坡长提取的影响[J]. 水利学报, 2017, 48(5): 568-575.
- [3] Liu B, Zhang K, Xie Y. An empirical soil loss equation [A]//Process of soil erosion and its environment effect; 国际水土保持大会论文集. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [4] 张宏鸣,杨勤科,刘晴蕊,等. 基于 GIS 的区域坡度坡长因子提取算法[J]. 计算机工程, 2010, 36(9): 246-248.
- [5] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning with Universal Soil Loss Equation(USLE)[M]. Washington, D C: Agriculture Handbook 703, 1978.
- [6] 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)[M]. USA: Washington, D C, Agriculture Handbook 703, 1997.
- [7] 汤国安,刘学军,房亮,等. DEM 及数字地形分析中尺度问题研究综述[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2006, 31(12): 1059-1066.
- [8] Yang Q K, Mcvicar T R, Niel T G V, et al. Improving a digital elevation model by reducing source data errors and optimising interpolation algorithm parameters: An example in the Loess Plateau, China[J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2007, 9(3): 235-246.
- [9] 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[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(5): 15-22.
- [10] 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[J]. 地理学报, 2003, 58(6): 824-830.
- [11] 陈楠,汤国安,刘咏梅,等. 基于不同比例尺的 DEM 地形信息比较[J]. 西北大学学报:自然科学版, 2003, 33(2): 237-240.
- [12] 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[J]. 地理学报, 2003, 58(6): 824-830.
- [13] 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[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2012, 37(1): 105-109.
- [14] Wang C, Yang Q, Guo W, et al. Influence of resolution on slope in areas with different topographic characteristics[J]. Computers & Geosciences, 2012, 41(2): 156-168.
- [15] 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[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(4): 73-78.
- [16] 王程,陈正江,杨勤科,等. 流域分布式坡长不确定性的初步分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(2): 15-18.
- [17] 秦伟,朱清科,张岩. 通用土壤流失方程中的坡长因子研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(2): 117-124.
- [18] Ivančev M D, Mitev Ī G, Janev N I. Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation[J]. Journal of Soil & Water Conservation, 1992, 47(5): 423-428.
- [19] 张宏鸣,杨勤科,李锐,等. 基于 GIS 和多流向算法的流域坡度与坡长估算[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 159-164.
- [20] Chilès J P, Delfiner P. Geostatistics: Modeling spatial uncertainty[M]. Hoboken New Jersey, John Wiley & Sons Inc UAS, 2012.

- [27] Palumbo A D, Vitale D, Campi P, et al. Time trend in reference evapotranspiration: analysis of a long series of agrometeorological measurements in Southern Italy [J]. *Irrigation and Drainage Systems*, 2011, 25(4): 395-411.
- [28] Espadafor M, Lorite I J, Gavilán P, et al. An analysis of the tendency of reference evapotranspiration estimates and other climate variables during the last 45 years in Southern Spain[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(6):1045-1061.
- [29] 王琼,张明军,潘淑坤,马雪宁. 长江流域潜在蒸散量时空变化特征[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(5):1292-1302.
- [30] Gong L, Xu C, Chen D, et al. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang(Yangtze River)basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 329(3):620-629.
- [31] 王艳君,姜彤,刘波. 长江流域实际蒸发量的变化趋势[J]. *地理学报*, 2010, 65(9):1079-1088.
- [32] Rensheng C, Shihua L, Ersi K, et al. Estimating daily global radiation using two types of revised models in China[J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(7):865-878.
- [33] 梁丽乔,李丽娟,张丽,等. 松嫩平原西部生长季参考作物蒸散发的敏感性分析[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(5):1-5.
- [34] 曾丽红,宋开山,张柏,等. 东北地区参考作物蒸散量对主要气象要素的敏感性分析[J]. *中国农业气象*, 2010, 31(1):11-18.
- [35] 刘昌明,张丹. 中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析[J]. *地理学报*, 2011, 66(5):579-588.
- [36] Roderick M L, Rotstayn L D, Farquhar G D, et al. On the attribution of changing pan evaporation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(17):251-270.
- [37] Donohue R J, Mcvicar T R, Roderick M L. Assessing the ability of potential evaporation formulations to capture the dynamics in evaporative demand within a changing climate[J]. *Journal of Hydrology(Amsterdam)*, 2010, 386(1):186-197.
- [38] Tang B, Tong L, Kang S, et al. Impacts of climate variability on reference evapotranspiration over 58 years in the Haihe river basin of north China[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(10):1660-1670.
- [39] Yang H, Yang D. Climatic factors influencing changing pan evaporation across China from 1961 to 2001 [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 414(2):184-193.
- [40] Hirsch R M, Slack J R, Smith R A. Techniques of trend analysis for monthly water quality data [J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(1):107-121.
- [41] Nam W H, Hong E M, Choi J Y. Has climate change already affected the spatial distribution and temporal trends of reference evapotranspiration in South Korea? [J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 150:129-138.
- [42] Duhan D, Pandey A. Statistical analysis of long term spatial and temporal trends of precipitation during 1901—2002 at Madhya Pradesh, India [J]. *Atmospheric Research*, 2013, 122:136-149.

~~~~~

(上接第76页)

- [21] Quinn P, Beven K, Chevallier P, et al. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models[J]. *Hydrological Processes*, 1991, 5(1):59-79.
- [22] 杨勤科, Mcvicar T R, 李领涛, 等. ANUDEM-专业化数字高程模型插值算法及其特点[J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(3):36-41.
- [23] 张彩霞, 杨勤科, 段建军. 高分辨率数字高程模型的构建方法[J]. *水利学报*, 2006, 37(8):1009-1014.
- [24] 张宏鸣, 杨勤科, 李锐, 等. 基于GIS和多流向算法的流域坡度与坡长估算[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(10):159-164.
- [25] 樊宇, 郭伟玲. 县南沟流域坡长尺度效应的ANUDEM研究[J]. *金属矿山*, 2017, 46(10):47-51
- [26] 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[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2012, 37(1):105-109.