

# 基于 DEM 的地形起伏度算法的比较研究

蒋好忱<sup>1</sup>, 杨勤科<sup>2</sup>

(1. 国家测绘地理信息局 第一地形测量队, 陕西 西安 710054; 2. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127)

**摘要:** 地形起伏度是描述宏观地形变化状况的地形因子, 可作为区域水土流失评价的地形指标之一。基于全国 1 000 m 分辨率 DEM 分别选取黄土高原、四川盆地、横断山区、东南丘陵、山东丘陵、东北地区 6 个典型样区, 采用局地高差法、局地标准差、表面积与投影面积比、RUGN 法、矢量法、RDLS(地表起伏度) 6 种算法进行起伏度的提取, 对提取结果进行了对比分析, 并对各种算法的提取结果进行了信息容量计算。结果表明, 局地标准差和局地高差法是两种相对较好的提取起伏度的方法, 且针对不同的地形区, 不同起伏度算法也具有各自的适宜性。

**关键词:** DEM; 地形起伏度; 算法比较; 信息容量

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2014)06-0162-04

中图分类号: P217, S157.1

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.06.037

## Algorithm Comparison of Relief Amplitude Based on Dynamic Effect Model

JIANG Hao-chen<sup>1</sup>, YANG Qin-ke<sup>2</sup>

(1. The First Topographic Surveying Brigade of NASG, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

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

**Abstract:** Relief amplitude is used as one of the terrain factors to describe the macroscopic topographic change, which can be used as one of the topographic indexes for evaluation of regional soil and water loss. The Loess Plateau, Sichuan basin, Hengduan mountainous region, Southeast hills, Shandong hills and northeast regions 6 typical samples were selected based on dynamic effect model(DEM) of 1 000 resolution of China, relief amplitude was extracted with the 6 methods of local elevation range, local standard deviation, the ratio of surface area and the projected area, RUGN, the vector method and relief degree of land surface (RDLS). The results of extraction were analyzed, and then the amounts of information were calculated. The results showed that local standard deviation and local elevation range were the two better methods, and different regions have different suitability.

**Keywords:** DEM; relief amplitude; algorithm comparison; information capacity

地形起伏度(relief amplitude)是定量描述地貌形态,划分地貌类型的重要指标<sup>[1]</sup>。目前,地形起伏度在各个学术应用领域都得到了广泛的关注(如水土流失定量评价<sup>[2]</sup>、潜在土壤侵蚀评价<sup>[3]</sup>、生态敏感性评价<sup>[4]</sup>、区域滑坡灾害评价<sup>[5]</sup>等)。在此基础之上,一些国内外学者对起伏度的计算方法有了一定的探讨。Olaya<sup>[6]</sup>总结提出了起伏度提取的 5 种算法,牛文元<sup>[7]</sup>在对我国 21 世纪环境情况的预测研究中,将全国区域内平地对地形起伏度的影响考虑在内,总结出了一种新的方法。在起伏度提取中窗口分析是较为常用的方式,刘振东<sup>[8-9]</sup>、刘新华<sup>[2]</sup>、朗玲玲<sup>[10]</sup>、张锦明<sup>[11]</sup>等人利用不同的数据源,采用不同的研究方法,

以不同范围的研究区确定了不同区域中的起伏度提取的窗口大小。虽然地形起伏度存在若干种算法,但现有研究中大多均采用局地高差法。为此,本研究尝试计算起伏度提取的不同算法,并对其进行了对比分析,研究结果对进一步明确地形起伏度的概念及其适用范围具有重要的指导意义,同时可为区域水土流失评价提供较为准确的起伏度数据。

## 1 研究方法

### 1.1 数据基础

以全国 1 000 m 分辨率 DEM 为数据基础。该数据利用了全国 8 740 幅 1 : 5 万和 3 861 幅 1 : 10

收稿日期:2013-11-06

修回日期:2013-12-10

资助项目:国家自然科学基金项目“地表坡度的统计分布理论模型研究”(41371274),“黄土丘陵沟壑区侵蚀地形空间频率层次性研究”(41301284)

作者简介:蒋好忱(1988—),男(汉族),江苏省扬州市人,硕士研究生,研究方向为 GIS 与遥感应用。E-mail:jianghaochenwy@126.com。

通信作者:杨勤科(1962—),男(汉族),陕西省陇县人,博士,教授,主要从事区域土壤侵蚀评价与侵蚀地形分析研究。E-mail:qkyang@nwu.edu.cn。

万地形图按  $28.125'' \times 18.750''$  (经差  $\times$  纬差) 采样得到。数据允许的最大高差读数误差为  $10 \sim 20$  m, 经投影换算及重采样后空间分辨率为  $1\ 000$  m, 投影方式为 Albers 投影。

为具有普适性, 在全国范围内我们分别选取了黄土高原、四川盆地、横断山区、东南丘陵、山东丘陵以及东北地区 6 个典型样区。每个样区面积大约为  $3.0 \times 10^4$  km<sup>2</sup>, 各样区基本资料详见表 1。

表 1 样区地表特征样区

编号	样区名称	平均坡度/度	坡度标准差/度	高差/m	高程标准差/m
1	东北地区	0.290	0.213	204.816	34.627
2	山东丘陵	1.050	1.002	797.481	117.999
3	黄土高原	1.225	0.614	780.530	117.894
4	四川盆地	0.542	0.389	370.558	50.805
5	横断山区	7.395	4.493	3 737.290	550.715
6	东南丘陵	2.250	2.083	1 849.477	286.203

### 1.2 起伏度算法及其提取

本研究就上文所提及的 6 种不同的算法(表 2) 进行比较分析。局地高差法用某特定范围内的高差(m)来表示地形起伏状况。该算法是比较流行的算法、也相对较简单。局地标准差用某特定范围内高程标准差(m)来表示地形起伏。这两种方法可通过邻域操作来完成。在 Arc/Info 中的 GRID 模块下, 分别利用 Focalrange, Focalstd 函数来计算。表面积与投影面积比也是计算起伏度的方法之一, 可求算投影面积/表面积, 再将结果换算为坡度的弧度值。RUGN 法是在局地高差法的基础上与分析窗口面积的开平方之比<sup>[12]</sup>。矢量法通过对坡度、坡向的三角函数运算, 得到垂直于地形表面每个像元的单位向量, 再对 3 个方向上的分量求取平方和并开平方得到起伏度(rad)<sup>[13]</sup>。RDLS 算法<sup>[7,14]</sup> 计算起伏度时将平地地区排除(最大高差小于等于 30 m 为平地<sup>[15]</sup>), 只将非平地地区参与运算。

表 2 6 种起伏度计算方法

编号	名称	算法(公式)	量纲
1	局地高差法	Focalrange(DEM, neighborsize)	m
2	局地标准差	standard deviation of elevation	m
3	投影面积/表面积	$1/\cos(s \cdot \pi/180)$	rad
4	RUGN	$\frac{\text{Range}}{\sqrt{a}}$	m
5	矢量法	$\sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^n X_i)^2 + (\sum_{i=1}^n Y_i)^2 + (\sum_{i=1}^n Z_i)^2}{n}}$	rad
6	RDLS	$[\max(H) - \min(H)] [1 - P(A)/A]$	m

算法 5 中的  $X_i, Y_i, Z_i$  这 3 个变量可分别由坡度  $s$ (弧度)和坡向  $a$  通过公式(1)计算得到:

$$\begin{aligned} X_i &= \sin(s) \cdot \cos(a) \\ Y_i &= \sin(s) \cdot \sin(a) \\ Z_i &= \cos(s) \end{aligned} \quad (1)$$

算法 6 中  $A$  为分析区域总面积,  $P(A)$  为平地面积。根据刘新华<sup>[2]</sup> 的研究, 本文算法中涉及窗口分析时, 分析窗口栅格数统一设为  $5 \times 5$ 。

### 1.3 比较方法

起伏度在一定程度上与坡度有着密切的关系, 两者在本质上都是地表垂直量与水平量关系的表达。起伏度在空间尺度上比坡度略微宏观。因此, 可以通过不同算法得到的起伏度与该地区的坡度进行比较, 从而确定不同的算法对地形起伏状况的不同表达程度。(1) 对比不同算法的地形起伏度表面与坡度表面结构的相似性, 可通过 Arc/Info GRID 模块中的 CORRELATION 函数计算图像的相关性指数; (2) 计算不同起伏度结果的信息量, 一般来说, 信息量越大对地表起伏状况表达的程度越详细; (3) 从统计分布上进行对比。对比不同算法的统计特征值以及其频率分布特征。

## 2 结果与分析

### 2.1 起伏度的提取

采用表 2 中的 6 种算法分别对黄土高原、四川盆地、横断山区、东南丘陵、山东丘陵、东北地区的典型样区进行起伏度的提取, 由提取结果分析得出, 不同算法提取的起伏度结果在结构上基本相似。与原始 DEM 表面纹理对比可知, 不同的算法计算出的起伏度较高的地区大多位于丘陵沟壑区的坡地上, 以及较陡的沟谷两侧; 在山顶以及沟谷的底部则起伏度较小。6 种算法提取的结果大致符合地形结构的分布状况, 6 种算法均可以正确的反映地表起伏度的变化趋势。虽然不同的算法提取的起伏度结果不同, 但并未改变地形分布的内在规律。

为比较不同算法间的差异性, 对 6 种算法提取的起伏度结果分别作频率曲线, 并对特征值进行统计, 再将结果统一拉伸为  $1 \sim 100$  之间(图 1)。一般来说, 在相同的地形区条件下样本足够大时起伏度应是一个正态随机变量, 其结果应大致接近于正态分布。由图 1 中可以看出, 除算法 3(投影面积比)之外, 各起伏度算法频率分布曲线均接近正态分布, 统计特征值也较为接近。投影面积比法分布状况虽呈正偏态, 但从图像上看提取结果依然尚可。矢量法和投影面

积比法由于经过三角函数运算,使得较其余 4 种方法在内部结构分布上数值于较小区域较为集中,这两种

方法在提取起伏度时会造成某些局部地区起伏度提取结果偏小。

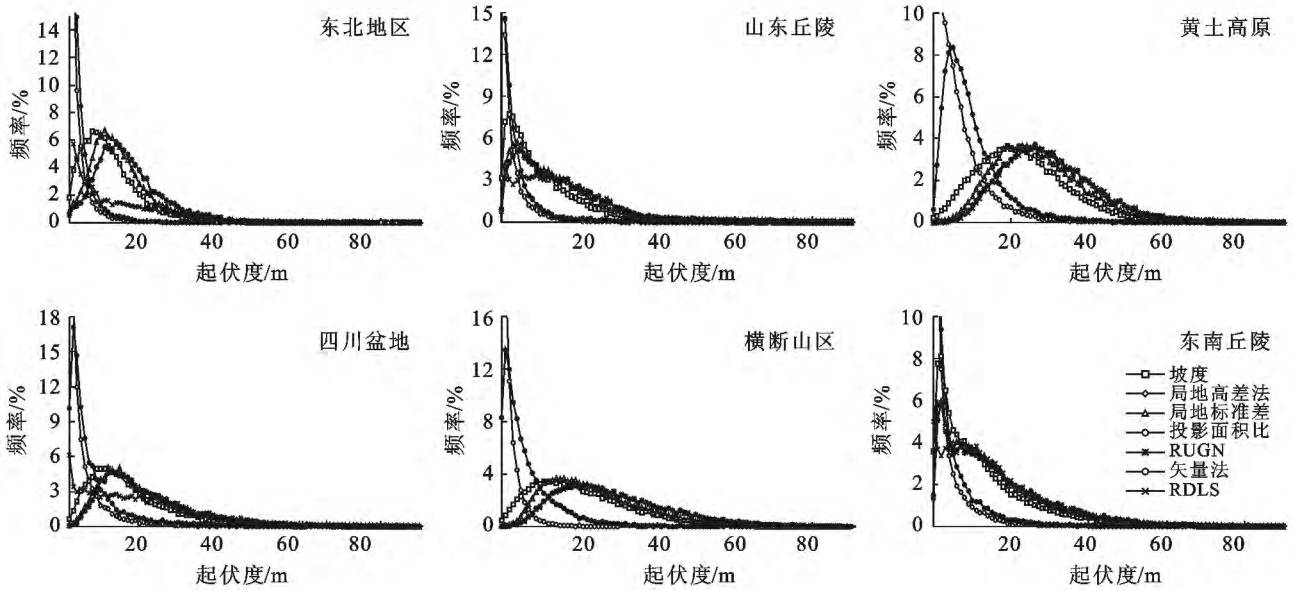


图 1 各地区不同起伏度算法频率分布曲线

### 2.2 相关性指数的计算

不同的起伏度提取方法在不同的地形地貌区的适用性是一个值得探索的问题。由于起伏度与坡度在本质上都是地表垂直量与水平量关系的表达,因此尝试将不同算法提取结果与该地形区的坡度进行比较,与坡度的相关性越好,则说明该方法在此地形区中越适用。采用 CORRELATION 函数提取各个样区中不同起伏度算法与坡度的相关系数(图 2),相关系数越接近于 1,则表示相关性越强。由图 2 可知,6 种不同的算法所提取的结果与坡度的相关性指数基本都位于 0.8 以上,整体相关性较好。但在不同的地形区中,各起伏度算法的适用性并不相同。适用性由高到低排序为:(1)东北地区。局地标准差法>局地高差法=RUGN>投影面积比法>矢量法>RDLS;(2)东南丘陵和山东丘陵区。局地标准差>局地高差法=RUGN>RDLS>投影面积比法>矢量法;(3)横断山区。局地标准差>局地高差法=RUGN>RDLS>矢量法>投影面积比法;(4)在黄土高原和四川盆地。投影面积比法>局地标准差>矢量法>局地高差法=RUGN>RDLS。

由分析结果可以看出,在大部分地区局地标准差、局地高差法以及 RUGN 法的适用性都比较好。RDLS 法在地形较为复杂的区域有较好的适用性,但是由于该方法将高差小于等于 30 m 的地区视为平地,忽略了平地地区的起伏度,因此在东北地区、四川盆地等较为平坦地形区的适用性并不理想。

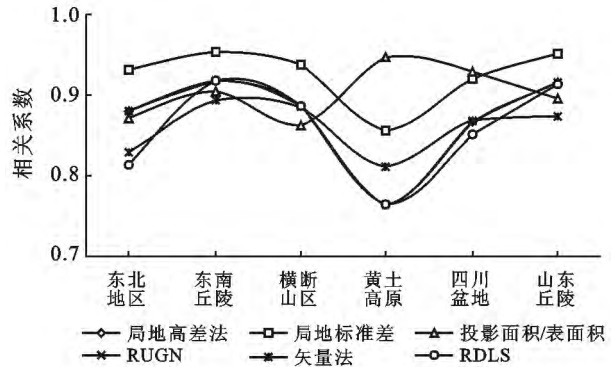


图 2 各地区不同起伏度提取结果与坡度的相关性

### 2.3 起伏度信息量的计算

信息容量的概念来自于计算机图形图像学,能够很好地描述图像表达内容的详细程度与复杂性。起伏度信息量的大小与结果的评价之间有着非常紧密的联系,信息量越大则表明对细节的表达程度越完整,效果越好;反之,则说明在局部地形的表达上不够完整。目前,定量计算信息容量的方法有很多种<sup>[16]</sup>,一般有标准差、均方误差、信噪比、平均梯度以及信息熵等方法。其中标准差和均方误差主要侧重于度量灰度像元值的离散程度,忽略了整体分布规律和视觉效果;而信息熵则主要统计了整体像元灰度值的丰富程度,对微观上各像元与其相邻像元之间的灰度值关联性考虑不足。

李志林<sup>[17]</sup>针对 DEM 提出了元分维模型的概念,这是一种能够有效揭示 DEM 中内部高程变异复杂性的新方法,它将传统的对 DEM 整体的综合平均分

维方法进行了一定的扩展。张哲<sup>[18]</sup>在此基础上利用二维直方图,通过统计邻近像元之间的离散程度,构建了基于图像复杂度评价的信息容量模型。本研究利用此方法,将 6 种算法提取的起伏度结果值统一拉伸至 0~255 之间,通过 Matlab 编程,分别计算坡度以及 6 种起伏度算法的信息量(图 3)。由图 3 可知,不同算法提取的起伏度信息量值较为接近,略小于坡度的信息量,且在地形较复杂的高原山地地区要明显高于地势较平坦的平原地区。就算法之间而言,局地标准差(std)、局地高差(focalrange)、RDLS 以及 RUGN 法在所选取的 6 个地形区中的信息量均略高于其他两种方法。与上文中各算法与坡度的相关性结论基本一致。

### 2.4 各种算法下起伏度的宏观格局分析

全国范围内,由各种算法起伏度的宏观格局(图 4)可知:(1)各算法所提取的地形起伏度基本上都能够反映全国地势的起伏变化分布情况。在天山、昆仑山、祁连山、横断山区等高山地区以及丘陵区 and 我国地形三级阶梯的分界线上的地形起伏度相对较大;在平原、盆地地区的起伏度较小;(2)由不同算法之间的比较可以发现:算法 3,算法 5 所得结果图的整体亮

度值较其他算法偏暗,这主要是因为这两种算法计算出的起伏度值在局部地区偏小。由于算法 6 在计算时认为高程差小于等于 30 m 的地区为平地(起伏度为 0),所以忽略了一些有微小起伏的区域,如长江中下游平原,塔克拉玛干沙漠等地区,与真实情况略有差别。虽然该方法在地势平缓地区的适宜性不高,但就全国范围而言,该方法依然具有可行性。算法 1,算法 2 提取的结果从图像上看较为适中;(3)分析各种算法与坡度的相关性(表 3)可知,在全国范围内,算法 1,算法 2 及算法 6 的结果与坡度最为吻合。

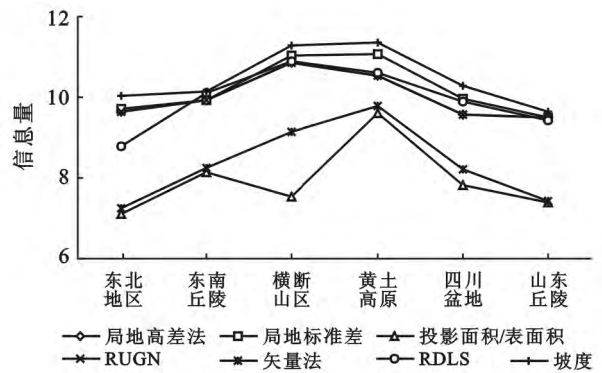


图 3 不同起伏度算法的信息量

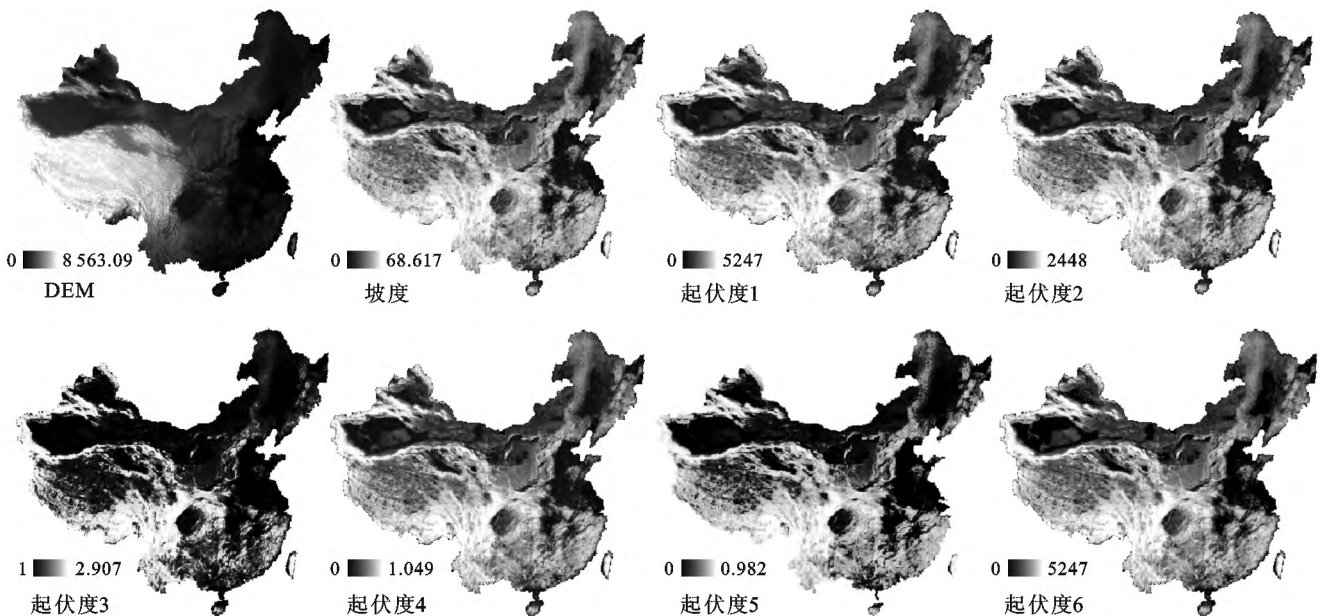


图 4 全国范围 6 种起伏度算法提取结果

注:起伏度分别为表 2 中 6 种方法的提取结果。

表 3 全国范围不同起伏度算法与坡度相关性

项目	算法 1	算法 2	算法 3	算法 4	算法 5	算法 6
与坡度相关系数	0.887	0.913	0.822	0.887	0.798	0.887

### 3 结论

(1) 从宏观上看,本研究所尝试的 6 种起伏度算法在结果上与地表的实际状况基本吻合,均可用于描述地表起伏变化的宏观趋势。但不同的算法在微观上存有一定的差异。通过不同算法自身的频率分布与特征统计的对比、不同样区中不同算法与坡度进行的相关性比较、以及不同算法信息量差异的计算可知,在大部分地区局地标准差、局地高差法、RUGN 是 3 种较为实用的起伏度提取算法,且计算方便;RDLS 法在起伏度较小的平原地区效果不够理想,这主要是由于 RDLS 方法在 1 000 m 分辨率时将高差  $\leq 30$  m 的地区视为平地,从而在起伏状况较小的平原地区难以详细鉴别地形起伏形态,会造成起伏度提取的失真,因此该方法主要适用于地表起伏相对复杂的丘陵山地等地区,且计算区域不宜过小;投影面积法和矢量法在提取起伏度时,表面纹理尚可,但在内部结构上往往在小值区域分布较为密集,在提取精度上存有一定的不确定性。

(2) 本研究旨在对起伏度的不同算法进行尝试和探讨。在样区的选取中主要以全国 1 000 m 分辨率 DEM 为数据源,过程中并未涉及其他分辨率数据,在其他分辨率条件下的适用性须进一步的研究与论证;同时,如何建立起起伏度与坡度之间的关系,在中分辨率条件下如何将起伏度数据应用于区域水土流失定量评价中,是一个亟待解决的问题。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 涂汉明,刘振东. 中国地势起伏度研究[J]. 测绘学报, 1991,20(4):311-319.
- [2] 刘新华,杨勤科,汤国安. 中国地形起伏度的提取及在水土流失定量评价中的应用[J]. 水土保持通报,2001,21(1):57-62.
- [3] 马晓微,杨勤科,刘宝元. 基于 GIS 的中国潜在水土流失评价研究[J]. 水土保持学报,2002,16(4):49-53.
- [4] 刘康,欧阳志云,王效科,等. 甘肃省生态环境敏感性评价及其空间分布[J]. 生态学报,2003,23(12):2711-2718.
- [5] 郭芳芳,杨农,孟晖,等. 地形起伏度和坡度分析在区域滑坡灾害评价中的应用[J]. 中国地质,2008,35(1):131-143.
- [6] Tomislav H, Hannes I, Reuter. Geomorphometry Concepts, Software, Applications[M]. Amsterdam: Elsevier, 2009.
- [7] Niu Wenyuan, Harris, William M. China: The forecast of its environmental situation in the 21st Century[J]. Journal of Environmental Management, 1996, (47): 101-114.
- [8] 刘振东,孙玉柱,涂汉明. 利用 DTM 编制小比例尺地势起伏度图的初步研究[J]. 测绘学报,1990,19(1):57-62.
- [9] 涂汉明,刘振东. 中国地势起伏度最佳统计单元的求证[J]. 湖北大学学报:自然科学版,1990,12(3):266-271.
- [10] 朗玲玲,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[J]. 地球信息科学,2007,9(6):1-6.
- [11] 张锦明,游雄. 地形起伏度最佳分析区域研究[J]. 测绘科学技术学报,2011,28(5):369-373.
- [12] Melton M A. The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits in Southern Arizona[J]. The Journal of Geology, 1965,(73):1-38.
- [13] Hobson R D. Spatial Analysis in Geomorphology[M]. New York: Harper & Row, 1972.
- [14] 王永丽,戚鹏程,李丹,等. 陕西省地形起伏度和人居环境适宜性评价[J]. 西北师范大学学报:自然科学版,2013,49(2):96-101.
- [15] 封志明,张丹,杨艳昭. 中国分县地形起伏度及其与人口分布和经济发展的相关性[J]. 吉林大学社会科学学报,2011,51(1):146-151.
- [16] 王占宏. 遥感影像信息量及质量度量模型的研究[D]. 湖北 武汉:武汉大学,2004.
- [17] 李志林,朱庆. 数字高程模型[M]. 湖北 武汉:武汉大学出版社,2001.
- [18] 张哲. 遥感图像信息容量的模型构建与差异性研究[D]. 陕西 西安:西北大学,2012.