

# 中国西南地区地形起伏度的最佳分析尺度确定

钟 静<sup>1,2</sup>, 卢 涛<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 成都生物研究所, 中国科学院 山地生态恢复与生物资源利用重点实验室, 生态恢复与生物多样性保育四川省重点实验室, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** [目的] 确定中国西南地区地形起伏度的最佳分析尺度并进行地形分级, 明确区域地形结构特点并进行地貌结构划分。[方法] 以 ASTER GDEMv2 数据为基础, 通过 Python 模块编程, 利用窗口分析方法提取西南地区各典型地貌以及整个区域  $n \times n$  ( $n=2, 3, 4, \dots, 181, 182, 183$ ) 窗口下的平均地形起伏度, 进而采用均值变点分析方法确定最佳统计窗口。[结果] ① 西南地区地形起伏度的最佳分析尺度为 2.43 km<sup>2</sup>; ② 区域地形起伏度以中小起伏为主, 其中小起伏 (200~500 m) 占 38.68%, 中起伏 (500~1 000 m) 占 23.58%; ③ 从空间分布来看, 西南地区的地形起伏度呈现中部高, 东南部次之, 西北部和东北部较低的特征。[结论] 以 2.43 km<sup>2</sup> 为最佳统计窗口提取的西南地区地形起伏度符合区域地形起伏特征, 同时较好地兼顾了各地貌类型的起伏特点。

**关键词:** 地形起伏度; ASTER GDEMv2; 最佳统计单元; 西南地区

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2018)01-0175-07

中图分类号: P931

**文献参数:** 钟静, 卢涛. 中国西南地区地形起伏度的最佳分析尺度确定[J]. 水土保持通报, 2018, 38(1): 175-181. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.01.031. Zhong Jing, Lu Tao. Optimal statistical unit for relief amplitude in Southwestern China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(1): 175-181.

## Optimal Statistical Unit for Relief Amplitude in Southwestern China

ZHONG Jing<sup>1,2</sup>, LU Tao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Ecological Restoration and Bioresource Utilization, Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Ecological Restoration Biodiversity Conservation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** [Objective] The objective of this article is to determine the best statistical unit to extract and classify the relief amplitude of Southwestern China, and then the characteristics of the amplitude structure and the classification of geomorphologic structure can be determined. [Methods] Based on ASTER GDEMv2 data and through Python module programming, the average relief amplitude in the Southwestern China and the typical experimental areas was extracted at  $n \times n$  windows ( $n = 2, 3, 4, \dots, 181, 182, 183$ ), and the best window area was calculated by the mean change point method. [Results] ① 2.43 km<sup>2</sup> was the optimal statistical unit for extracting amplitude relief in the study area. ② Fluctuation of terrain was moderate and low in the study area, with the relief amplitude between 200 m to 500 m having the highest proportion (38.68%), and that between 500 m to 1 000 m accounting for 23.58%. ③ As for the spatial distribution, the relief amplitude of the middle region was generally higher than that of other regions, followed by the southeast, lower in the northwest and northeast. [Conclusion] The method, computing relief amplitude with optimum statistical unit of 2.43 km<sup>2</sup>, conformed to the regional terrain characteristics and balanced the various landform types.

**Keywords:** relief amplitude; ASTER GDEMv2; optimal statistical unit; Southwestern China

收稿日期: 2017-06-27

修回日期: 2017-08-03

资助项目: 国家重点研发计划项目“西南生态格局形成的环境机制”(2016YFC0502101); 国家自然科学基金面上项目(41371126)

第一作者: 钟静(1992—), 女(汉族), 四川省成都市人, 硕士研究生, 从事景观生态学研究。E-mail: zhongjing@cib.ac.cn。

通讯作者: 卢涛(1975—), 男(汉族), 四川省成都市人, 博士, 副研究员, 从事景观生态学研究。E-mail: lutao@cib.ac.cn。

地形起伏度 (relief amplitude) 指某一确定面积内最高点和最低点的高差<sup>[1-2]</sup>。其是受地质构造与地表剥蚀相互作用而成<sup>[3-4]</sup>, 是定量描述地貌形态特征, 划分地貌单元的重要依据<sup>[5-6]</sup>。在传统研究方法中, 由于数据量大和计算繁琐方面的限制, 地形起伏度仅在地貌地形图的绘制等方面发挥作用<sup>[7]</sup>。随着区域人口、经济的发展, 生态环境问题逐渐引起人们的关注, 地形起伏度作为生态环境评价的重要指标, 日益受到国内外学者的广泛应用。近年来, 随着数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 数据库的建立和计算机的广泛使用, 以 DEM 为基本信息源对区域地形起伏度的研究逐渐兴盛起来<sup>[8]</sup>。

提取地形起伏度的关键在于确定最佳统计单元<sup>[9]</sup>, 即确定一定的面积, 使得该面积既能反映区域地貌的完整性又能普遍代表该区域的地貌特征<sup>[1]</sup>。最佳统计单元的确定具有较大的不确定性和明显的尺度效应<sup>[10-13]</sup>, 随着统计单元大小的改变, 区域内高差值随之改变, 使得单元内地形起伏度值也发生改变, 进而直接影响整个研究区域地形起伏度的提取精度<sup>[14]</sup>。此外, 由于不同研究区地形特征各异, 各个领域研究目的不尽相同, 对数据精度要求也不同。因此, 研究所采用的基础数据、提取方法、最佳统计单元的确定以及等级划分都存在差异<sup>[15]</sup>。关于最佳统计单元的确定, 主要方法有样地判别法、最大高差法、人工目测法和均值变点分析法等。如涂汉明等<sup>[5]</sup>采用样地判别法, 认为中国存在 2, 10, 16, 20, 22 km<sup>2</sup> 共 5 种不同规模的地形起伏度最佳统计单元。王玲等<sup>[16]</sup>采用新疆 1: 25 万 DEM 数据, 基于 3×3, 5×5, 7×7, …, 30×30 的窗口序列, 通过最大高差法和人工目测法确定新疆地形起伏度的最佳统计单元为 2.56 km<sup>2</sup>。王让虎等<sup>[17]</sup>采用均值变点分析法, 确定中国东北地区地形起伏度提取的最佳窗口为 2.62 km<sup>2</sup>。陈学兄等<sup>[18]</sup>同样采用窗口分析法和均值变点分析法, 确定 0.899 km<sup>2</sup> 为陕西省地形起伏度的最佳统计单元。可见, 窗口分析法和均值变点分析法已成为确定地形起伏度最佳统计单元的主流研究方法。

目前, 中国地形起伏度的研究区域多集中于北部及中东部地区, 而对地形起伏较大, 结构复杂的区域, 研究相对较少<sup>[19]</sup>。中国西南地区作为地貌类型多样的独特地理单元, 其复杂的地形特征极大地影响着区域的生态格局。明确西南地区地形结构特点和地貌结构划分, 对区域环境保护和发展具有重要意义。本文拟在总结概括国内外关于地形起伏度的研究方法和技术思路的前提下, 确定以中国西南地区分辨率为 30 m×30 m 的 DEM 数据为基础数据, 通过地貌形

态特征划分地貌类型中典型区域, 并利用 Python 模块实现窗口的提取以及最佳统计单元的确定, 从而实现西南地区地形起伏度的提取, 其中如何兼顾各地貌类型的特点并确定出唯一适宜整个西南地区地形起伏度提取的最佳统计窗口成为本文研究重点。

## 1 研究区概况

本文所指的中国西南地区, 包括云南、四川、贵州、广西、重庆、青海的南部地区以及西藏的中东部地区, 地理坐标为东经 83.862°—112.069°, 北纬 21.135°—36.482°, 总面积为 2.55×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>。西南地区横跨中国地形一、二、三级阶梯, 地形结构复杂, 地貌类型多样且内部空间差异较大<sup>[19]</sup>, 既有平均海拔高达 4 500 m 的青藏高原, 又有地势平坦的成都平原, 还有山高谷深、山河相间的横断山区, 以及石灰岩广布, 地表崎岖不平的喀斯特地貌区。西南地区生态系统复杂多样, 生物多样性和水资源等自然资源丰富, 是中国长江流域、珠江流域以及西南诸河的源头及上游区, 对于维系中国华东、华南乃至东南亚的生态及社会经济安全起着重要的作用, 是中国重要的生态屏障区。

## 2 研究材料与方法

### 2.1 数据来源

文中采用的 DEM 数据为 ASTER GDEMv2 (30 m), 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站 (<http://www.Gscloud.cn>)。原始数据覆盖研究区范围, 通过 ArcGIS 软件进行拼接投影等前期处理后, 采用西南地区的矢量图形对 DEM 数据进行裁剪, 从而得到整个西南地区的 DEM 数据。

### 2.2 地貌类型划分

西南地区地形复杂, 涵盖高原、山地、丘陵、平原等多种地貌类型。为了更为全面地掌握整个西南地区地形起伏度状况, 以及各类地貌类型间最佳统计面积的差异, 本文分别针对各代表性地貌类型以及整个西南地区, 确定了各自地形起伏度所对应的最佳统计单元。由于地貌发育的阶段性和特殊性, 自然区划往往无法给出各种地貌划分的明确界线。因此, 本文在参考已有文献和中国地形图的基础上, 确定出高原、山地、丘陵以及平原作为研究区 4 种代表性地貌单元, 以此兼顾区域地貌完整性与普适性。

### 2.3 地形起伏度提取

采用窗口分析方法提取各典型地貌区的地形起伏度值。如图 1 所示, 窗口分析法的基本原理是: 基于 DEM 栅格数据, 确定具有固定分析半径  $n \times n$  的窗口值, 通过设定起始窗口, 移动步距以及终止窗口

分别计算各窗口内最大值和最小值的差值作为目标窗口地形起伏度值。最后,通过窗口步距进行逐一

移动,从而实现各个窗口下目标栅格的地形起伏度值获取。

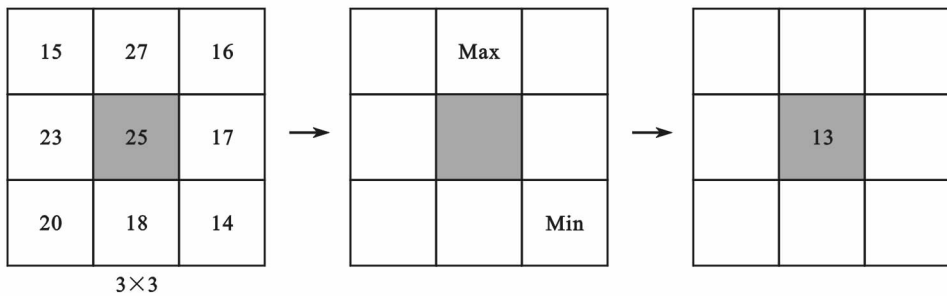


图 1 窗口分析示意图

本文根据区域地貌类型,确定了  $2 \times 2$  ( $0.036 \text{ km}^2$ ) 为起始窗口,移动步距为 1,终止窗口为  $183 \times 183$  ( $30.14 \text{ km}^2$ ) 的矩形分析窗口,分别对青藏高原、横断山区、喀斯特地貌和成都平原 4 种典型地貌进行地形起伏度提取。依托 ArcGIS 软件的空间分析功能,通过 Spatial Analyst 工具中的栅格邻域计算工具 Neighborhood Statistics,选择矩形分析窗口并依次计算窗口  $n \times n$  ( $n = 2, 3, 4, \dots, 181, 182, 183$ ) 内最大高程值和最小高程值,进而利用 Raster Calculator 计算最大值层和最小值层的差值即可得到地势起伏度层。其中,计算所得每个栅格的值表示以该窗口为目标窗口的确定邻域内的地形起伏度值。最后,计算  $n \times n$  窗口下栅格起伏度值的平均值,所得值作为该分析窗口下的地形起伏度值。由于本文研究区域范围较广,采用 30 m 分辨率的 DEM 数据,并且窗口设置数量较多,窗口移动步距较短,使得计算过程繁复,数据处理缓慢并产生大量缓存文件。因此,本文通过 ArcGIS 中的 Python 模块,通过编译程序,实现地形起伏度的自动提取以减少数据误差,提高数据精度。

### 2.4 最佳统计单元确定

地形起伏度提取的关键在于最佳统计单元的确定。已有研究表明,地势起伏度随统计面积的变化曲线呈 logarithmic 曲线<sup>[20-21]</sup>。即随着统计单元面积的扩大,地形起伏度值随之呈现出先快速增大,经过唯一拐点之后增速明显减缓并呈现缓慢增大的过程。该曲线上存在的唯一“拐点”所对应的统计单元面积即为最佳统计单元。均值变点分析法对有且只有一个拐点的检验最为有效<sup>[16]</sup>,该方法已逐渐发展为类似研究的最主流方法。本文以统计窗口面积为横坐标,各窗口对应的平均起伏度值为纵坐标绘制窗口面积与地形起伏度对应关系的拟合曲线,通过均值变点分析法寻找拐点。基本计算过程为:根据研究数据设定以渐变窗口下的平均地形起伏度值作为非线性系

统输出数据,即样本序列  $\{x_m, m = 1, 2, \dots, N\}$ 。其中,每一个  $m$  将样本量分为 2 段,分别是  $m_1, m_2, m_3, \dots, m_{n-1}$  与  $m_n, m_{n+1}, \dots, m_N$ 。该方法主要由以下 3 个步骤完成:

(1) 计算各段样本的算数平均值 ( $X_{m1}$ ) 和 ( $X_{m2}$ ) 以及各段的统计量  $S_m$ 。

$$S_m = \sum_{m=1}^N (X_m - X_{m1})^2 - \sum_{m=1}^N (X_m - X_{m2})^2 \quad (1)$$

式中:  $S_m$ ——2 段样本离差平方和的差值;  $N$ ——总样本数。

(2) 计算总样本量的离差平方和。

$$\bar{X} = \sum_{m=1}^N X_m / N \text{ 和 } S = \sum_{m=1}^N (X_m - \bar{X})^2 \quad (2)$$

式中:  $\bar{X}$ ——总体样本的算术平均值;  $N$ ——总的样本个数;  $S$ ——总的离差平方和。

(3) 计算期望值  $E(S - S_m)$ 。变点的存在会使总样本的统计量  $S$  与样本分段后的统计量  $S_m$  之间的差距增大<sup>[20]</sup>,最大期望值所对应的窗口大小即为最佳统计窗口。

根据均值变点分析法的计算原理,同样通过编译 Python 程序运行计算过程,从而确定各典型地貌单元和整个西南地区地形起伏度提取的最佳统计面积。

### 2.5 地形起伏度空间自相关分析

空间自相关是指一定范围研究区域内,研究对象与空间位置之间存在的相关关系。该值是检验某一空间领域的属性值与相邻空间上的属性值是否相关的重要指标<sup>[22]</sup>。空间自相关分为正、负两类,正相关表示某单元的属性值与其相邻空间单元的属性值具有相同的变化趋势,表示空间格局存在集聚性,负相关则相反<sup>[23]</sup>。

本文以全局自相关指数 Moran's I 对属性值在整个区域的空间特征进行描述,其值介于  $-1 \sim 1$  之间<sup>[23-24]</sup>。所得值大于 0,表明研究对象存在空间正相关;等于零表示不存在空间相关性;而小于零则表示

存在负相关关系<sup>[25-26]</sup>。计算公式如下:

$$I = \frac{n}{S_0} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (3)$$

式中: $n$ ——研究对象的数量; $x_i$ ——第  $i$  个空间单元的观测值; $\bar{X}$ —— $x$  的平均值; $S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}$ ——空间权重矩阵; $w_{ij}$ ——要素  $i$  和要素  $j$  的权重。本文采用 Queen's 标准的空间邻接。计算完成后采用  $Z$  检验对统计结果进行检验。

由于全局空间自相关不能对聚集或异常发生的空间位置进行确定。因此本研究进一步采用空间关联局域指标 LISA(local indicators of spatial association)指数分析局部空间自相关性。其本质是将 Moran's 指数分解到一定的区域单元,以分析要素属性与周边属性值的相关关系<sup>[27]</sup>。其关联模式可分为“高一高”关联、“低—低”关联 2 种空间正相关,以及

“低—高”、“高一低”关联 2 种空间负相关。其中“高一高”表示某一区域的属性值与其周围区域的属性值都较高;“高一低”表示某一区域的属性值较高而周围区域属性值较低;“低—低”与“低—高”则反之。将整个西南地区县级行政单元与地形起伏度值进行叠加,采用 ArcGIS 的 zone statistic 工具进行各县域地形起伏度的分区统计并完成基于县域的地形起伏度赋值,进而通过空间分析工具实现西南地区地形起伏度的空间自相分析。

### 3 结果与分析

#### 3.1 地形起伏度拟合曲线

通过 Python 模块编程,实现高原(青藏高原区)、山地(横断山区)、丘陵(喀斯特地貌区)、平原(成都平原区)以及整个西南地区  $2 \times 2, 3 \times 3, \dots, 182 \times 182, 183 \times 183$  窗口下的地形起伏度提取。得到窗口面积及对应的平均地形起伏度值如表 1 所示。

表 1 研究区网格单元大小与平均地形起伏度的对应关系

网格大小	面积/km <sup>2</sup>	平均起伏度/m				
		高原	山地	丘陵	平原	西南地区
		青藏高原	横断山区	喀斯特地区	成都平原	
2×2	0.003 6	4.405 2	18.086 0	12.159 7	2.219 7	12.518 1
3×3	0.008 1	8.647 2	35.603 1	23.486 3	4.341 8	24.535 0
4×4	0.014 4	12.723 2	52.698 2	34.118 4	6.333 0	36.180 2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
48×48	2.073 6	117.469 4	539.825 5	251.254 9	46.155 4	340.753 5
49×49	2.160 9	119.221 7	547.063 0	254.043 8	46.840 3	345.541 7
50×50	2.250 0	120.826 4	555.018 6	257.110 0	47.265 8	349.9926
51×51	2.340 9	122.510 1	562.678 4	259.973 0	47.768 7	354.734 6
52×52	2.433 6	124.181 4	569.013 7	262.750 4	48.485 0	359.208 6
53×53	2.528 1	125.748 6	576.721 0	265.227 5	49.050 0	363.800 0
54×54	2.624 4	127.359 3	583.949 2	268.116 7	49.449 3	368.247 1
55×55	2.722 5	129.136 0	591.077 2	270.785 1	50.261 9	372.456 1
56×56	2.822 4	130.636 9	597.512 7	273.584 5	50.836 4	376.751 6
57×57	2.924 1	132.265 3	604.905 0	276.095 6	51.059 0	381.064 5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
181×181	29.484 9	279.330 5	1 137.598 0	482.680 3	102.457 0	726.760 1
182×182	29.811 6	279.890 5	1 139.220 0	484.693 1	102.180 3	729.462 7
183×183	30.140 1	281.069 4	1 143.786 0	485.338 3	102.651 4	731.463 0

从表 1 可见,4 个典型地貌类型区以及整个西南地区地形起伏度值均呈现随窗口对应的栅格面积增加而增加的特征。4 个地貌区在同样的统计面积下计算出的地形起伏度值差异较大。如同为  $50 \times 50$  的窗口下,高原(青藏高原区)计算所得的地形起伏度值为 120.83 m,山区(横断山区)为 555.02 m,丘陵(喀斯特地貌区)地形起伏度值为 257.11 m,平原(成都平原区)为 47.27 m,不同地貌类型地形起伏度值差值高达 507.75 m。而整个西南地区由于面积远远大

于其他区域,在同样的  $50 \times 50$  窗口下所得的地形起伏度值高达 349.99 m。可见,由于地貌类型以及研究区面积大小的不同,最佳统计尺度也存在明显差异。

利用 Origin 软件对表 1 中各窗口对应的统计面积和平均地形起伏度进行对数方程拟合,分别得到青藏高原区、横断山区、喀斯特地貌区和成都平原区 4 种地貌类型以及整个西南地区的地形起伏度拟合曲线(图 2)。从图 2 中可以看出,所有区域的拟合曲线均拟合效果较好,且通过统计检验。

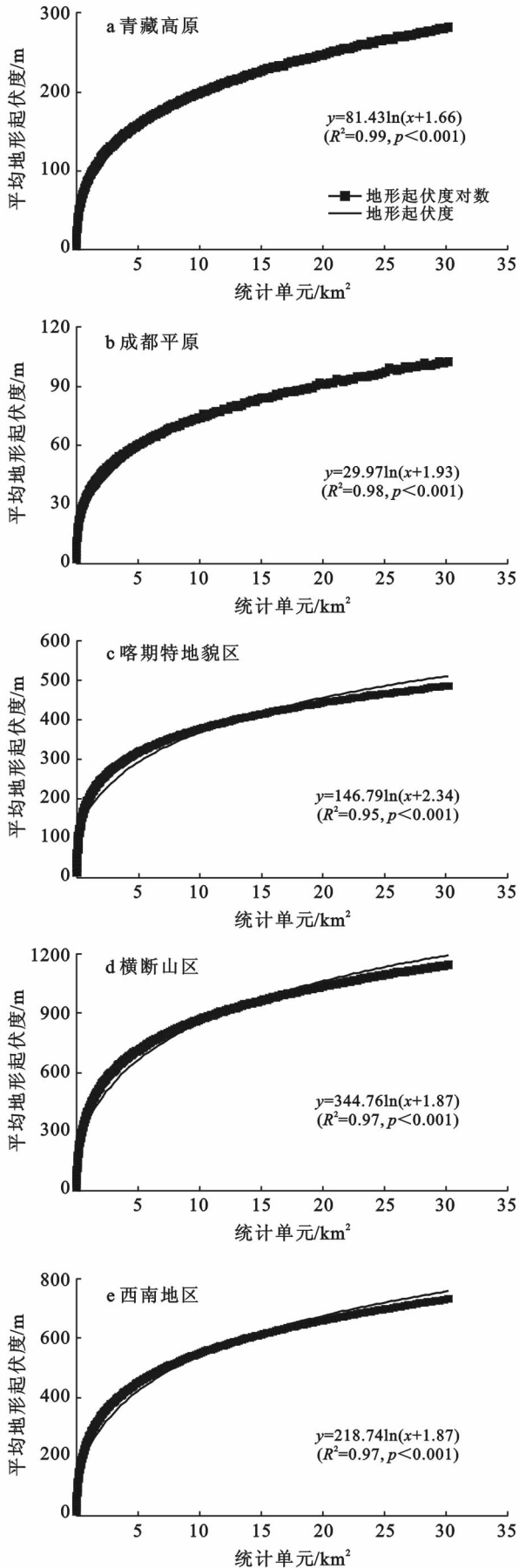


图 2 统计单元与平均地形起伏度对应关系拟合曲线

### 3.2 最佳统计单元确定

由图 2 可见, 4 个地貌区的地形起伏度值在 0~2 km² 均呈现出快速增加的趋势, 曲线较陡; 在 2~3 km² 起伏度值增速减缓, 曲线随之由陡变缓。说明在 2~3 km² 存在曲线由陡变缓的拐点。基于均值变点分析法, 采用 Python 模块编程分别计算 4 种地貌类型的典型区域以及整个西南地区的最佳统计窗口值, 得出青藏高原最佳统计窗口为 50×50 (2.25 km²); 横断山区最佳统计窗口为 54×54 (2.62 km²); 喀斯特地貌区最佳统计单元为 51×51 (2.34 km²); 成都平原最佳统计窗口为 49×49 (2.16 km²); 整个西南地区最佳统计窗口为 52×52 (2.43 km²)。其中横断山区与成都平原之间的窗口面积相差最大 (0.46 km²), 其他区域存在差异但相对较小。

### 3.3 西南地区地形起伏度

通过计算 52×52 (2.43 km²) 窗口下西南地区地形起伏度值, 得到整个西南地区地形起伏度的专题图层。在国内外地貌传统分类的基础上, 采用地形起伏度作为第一分级指标, 将中国地形起伏度以 30, 70, 200, 500, 1 000, 2 500 m 为间隔, 划分为 7 个等级。本研究根据这 7 个等级将地形起伏度分为平坦、缓起伏、微起伏、小起伏、中起伏、大起伏和极大起伏区域, 进而绘制西南地区地形起伏度图 (图 3), 并计算得到各级起伏度的面积 (表 2)。

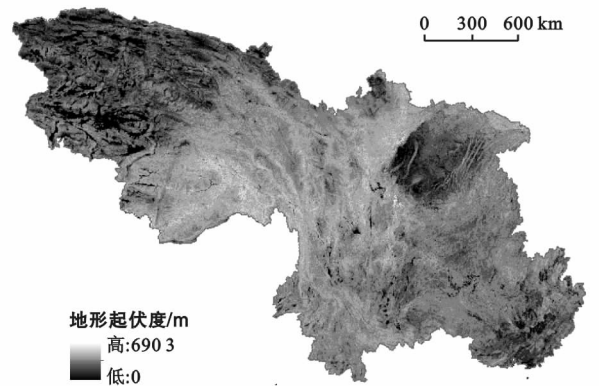


图 3 中国西南地区地形起伏度分级

根据图 3 和表 2 可知, 整个西南地区地形起伏度主要以中、小起伏为主, 低起伏次之。其中, 小起伏度面积最大, 占总面积 38.68%; 中起伏度面积占比 23.58%, 二者占总面积的比例之和高达 62.26%; 低起伏区面积比为 21.15%, 仅次于中起伏度地区; 缓起伏区和平坦区面积占总研究区面积的比例分别为 8.15% 和 5.80%; 只有 2 900.85 km² 的区域为极大

起伏区,仅占总面积的 0.11%。可见,整个西南地区地形起伏度差异较大,除了极少部分区域存在极大起伏和平坦区外,大部分地区地形起伏度呈现出中、小起伏的特征。

从分布格局而言,西南地区地形起伏度的分布规律为:平坦区(0~30 m)和缓起伏区域(30~70 m)分布较为集中,主要分布在西北部区域和东北部区域;微起伏区(70~200 m)主要分布在东南部部分区域;大起伏度区(1 000~2 500 m)以及极大起伏区(2 500~6 903 m)则主要分布在研究区域的中部地区;而小起伏(200~500 m)和中起伏区(500~1 000 m)主要分布在东南部区域。从整体地势起伏情况来看,西南地区呈现出中部高,东南部次之,西北部和东北部较

低的特征。这与西南地区地貌类型分布情况相适应:研究区西北部为青藏高原区,东缘为中起伏和大起伏区域交错分布,可见高原边缘地形起伏较大,而高原内部地形起伏度较小,多为 30~70 m 的缓起伏与高原边缘起伏较大而高原面较为平坦的特点相符合;中部横断山区横跨中国地形第一、二阶梯,山河相间,纵列分布,山高谷深,地形起伏度大,成为整个研究区内大、中起伏和极大起伏的主要分布区;中东部地区为云贵高原,由于该区域内部广泛分布着崎岖不平的喀斯特地貌,使得该区地形起伏主要以中小起伏为主;东南部涵盖两广丘陵区域,而东北部则为四川盆地以及盆地内部的成都平原,与图示低起伏、微起伏区和平坦区分布区域相符合。

表 2 中国西南地区地形起伏度分级

项目	地形起伏度分级						
	平坦 (0~30)	缓起伏 (30~70)	微起伏 (70~200)	小起伏 (200~500)	中起伏 (500~1 000)	大起伏 (1 000~2 500)	极大起伏 (2 500~6 903)
像元个数	164 119 280	230 732 320	598 300 560	1 094 389 920	667 168 736	71 401 824	3 223 168
面积/km <sup>2</sup>	147 707.3	207 659.1	538 470.5	984 950.9	600 451.8	64 261.64	2 900.85
面积比/%	5.80	8.15	21.15	38.68	23.58	2.52	0.11

### 3.4 地形起伏度空间自相关分析

全局空间相关性分析结果表明,整个西南地区地形起伏度的 Moran'I 值为 0.603 ( $p < 0.001$ )。可见西南地区的地形起伏度分布在整体上存在着集聚或者分散格局。为进一步了解西南地区地形起伏度的空间异质性并明确集聚区域所在的空间位置,本文绘制了中国西南地区地形起伏度的 LISA 集聚图(图 4)。从图 4 可以看出,呈现空间正相关性的“高一高”区域主要集中在青藏高原南缘、横断山区、川西北高山高原区所在的各区县。主要原因在于这些区域内部的地形复杂,高差各异,地形起伏度值都较大。而“低—低”聚集区域主要集中在四川盆地和广西山地丘陵性盆地所在的县域单元。主要原因是区域内部的四川盆地西部为地势平坦的平原,中部为方山丘陵,东部为低山丘陵,整体地形起伏较小;而广西山地中丘陵平地所占面积较多,整体地形起伏相对也不大,区域内地形起伏度值表现为低值与低值的集聚。呈现空间负相关性的“低—高”聚集只存在于川西甘南的碌曲县、若尔盖县及红原县的少部分地区,表明该区域内部地形起伏度之间存在较大的空间异质性。其余区县单元地形起伏度的相关性都不显著。总体而言,西南地区的中部山区以及成都平原区、广西丘陵区各县域单元之间存在着明显的聚集格局。

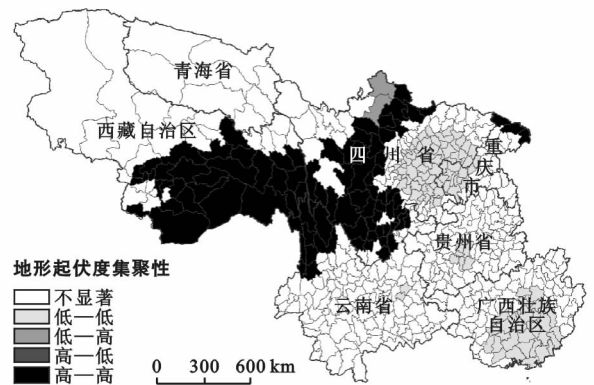


图 4 中国西南地区地形起伏度的 LISA 集聚

## 4 讨论和结论

(1) 通过 Python 编程实现地形起伏度的自动提取和最佳统计单元的确定,操作简单高效且减少大量不必要的缓存文件。以往的常规算法通常产生大量缓存文件,严重限制了窗口数量的设置<sup>[28,20]</sup>。通过减少窗口数量或者增加窗口步距,虽然能够减少计算量,但因此也造成了结果不够精确<sup>[19,29-31]</sup>。近年来,Python 模块虽逐渐应用于地形起伏度的自动提取,但其在最佳窗口确定上应用非常少见<sup>[17]</sup>。本研究通过 Python 编程,完成地形起伏度自动提取的同时,还通过均值变点分析法实现最佳窗口的判定。该方法的采用,高效低耗且有效避免由于人为操作产生的误

差,从而有效保证了地形起伏度提取精确度。

(2) 影响地形起伏度提取最佳适宜尺度的因素较多,窗口大小及数量的设置,地貌类型的差异以及研究区面积大小等是影响区域地形起伏度最佳适宜尺度的主要因素。曹伟超等<sup>[32]</sup>计算得出中国西南地区最佳统计单元为 2.34 km<sup>2</sup>,与本文所得结果 2.43 km<sup>2</sup> 相近。但该文的分析方法存在 2 个不足,一是窗口数量仅为 41×41,数据量较小;二是拐点的判定是在均值变点分析法的基础上通过人为主观确定。上述 2 个方面都将影响研究结果的精确度和客观性。而本文采用 Python 编程,较好地避免了窗口数量较大带来的计算困扰以及人为判定拐点所导致的误差,因此能够相对客观地求取最佳窗口。值得特别指出的是,韩海辉等<sup>[29]</sup>认为青藏高原的最佳统计面积为 1.17 km<sup>2</sup>,该结果与本文所得的 2.25 km<sup>2</sup> 相差较大。究其原因,除了该文采用的最大窗口为 32×32,与本文 183×183 相去甚远以外,两篇文章的研究区范围也存在很大差异,韩海辉以整个青藏高原为研究区,而本文只关注青藏高原中东部地区(多为高原面)。

(3) 西南地区地形起伏度以中小起伏为主,低起伏次之。其中,中部的横断山区地形起伏度最大,东南部的喀斯特地貌区次之,最低值为成都平原。地形起伏度的空间自相关分析结果中,“高高”与“低低”正相关的集聚地区也与实际地形起伏度分布的区域相符合。为了尽可能保证最佳分析尺度的可信度,以往的研究或通过采取不同分辨率的基础数据以兼顾原始数据的尺度效应<sup>[21,33]</sup>,或设置不同窗口类型以兼顾邻域类型对最佳分析尺度的影响<sup>[18]</sup>,或采取多种样地类型以兼顾地貌类型的多样性<sup>[34]</sup>。但就某一个研究案例而言,很少同时兼顾多种因素,以至影响最佳分析尺度的精确度。本研究基于面积广阔的中国西南地区,采用 30 m 分辨率的原数据并设置步长为 1,终止窗口为 183×183 的窗口数据,有效考虑了与分析尺度相关的多种影响因素,从而提高了最佳分析尺度确定的精确度。

#### [参 考 文 献]

[1] 刘振东,涂汉明. 中国地势起伏度统计单元的初步研究[J]. 热带地理,1989,9(1):31-38.

[2] Deffontaines B, Lee J C, Angelier J, et al. New geomorphic data on the active Taiwan orogen—a multisource approach [J]. Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 1994,99(B10):20243-20266.

[3] Kuhni A, Pfiffner O A. The relief of the Swiss Alps and adjacent areas and its relation to lithology and structure: Topographic analysis from a 250 m DEM [J]. Geomor-

phology, 2001,41(4):285-307.

- [4] 张会平,杨农,张岳桥,等. 岷江水系流域地貌特征及其构造指示意义[J]. 第四纪研究,2006,26(1):126-135.
- [5] 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.
- [6] 哈凯,丁庆龙,门明新,等. 山地丘陵区土地利用分布及其与地形因子关系:以河北省怀来县为例[J]. 地理研究,2015,34(5):909-921.
- [7] 游珍,杨艳昭,姜鲁光,等. 基于 DEM 数据的澜沧江—湄公河流域地形起伏度研究[J]. 云南大学学报:自然科学版,2012,34(4):393-400.
- [8] 朱红春,陈楠,刘海英,等. 自 1:10000 比例尺 DEM 提取地形起伏度:以陕北黄土高原的试验为例[J]. 测绘科学,2005,30(4):86-88.
- [9] 范建容,张子瑜,李立华. 四川省山地类型界定与山区类型划分[J]. 地理研究,2015,34(1):65-73.
- [10] Prima O D A, Echigo A, Yokoyama R, et al. Super-vised landform classification of Northeast Honshu from DEM-derived thematic maps [J]. Geomorphology, 2006,78(3/4):373-386.
- [11] Zevenbergen L W, Thorne C R. Quantitative-analysis of land surface-topography [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1987,12(1):47-56.
- [12] 江晓波. 中国山地范围界定的初步意见[J]. 山地学报,2008,26(2):129-136.
- [13] Liu Chun, Sun Weiwei, Wu Hangbin. Determination of complexity factor and its relationship with accuracy of representation for DEM terrain [J]. Geo-spatial Information Science, 2010,13(4):249-256.
- [14] 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[J]. 地球信息科学,2007,9(6):1-6.
- [15] Feng Zhiming, Tang Yan, Yang Yanzhao, et al. The relief degree of land surface in China and its correlation with population distribution [J]. Acta Geographica Sinica, 2007,62(2):1073-1082.
- [16] 王玲,同小娟. 基于变点分析的地形起伏度研究[J]. 地理与地理信息科学,2007,23(6):65-67.
- [17] 王让虎,张树文,蒲罗曼,等. 基于 ASTER GDEM 和均值变点分析的中国东北地形起伏度研究[J]. 干旱区资源与环境,2016,30(6):49-54.
- [18] 陈学兄,张小军,常庆瑞. 陕西省地形起伏度最佳计算单元研究[J]. 水土保持通报,2016,36(3):265-270.
- [19] 陈田田,彭立,刘邵权,等. 基于 GIS 的横断山区地形起伏度与人口和经济的关系[J]. 中国科学院大学学报,2016,33(4):505-512.
- [20] 张军,李晓东,陈春艳,等. 新疆地势起伏度的分析研究[J]. 兰州大学学报:自然科学版,2008,44(S1):10-13.

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] Turner II B L. Local faces, global flows; The role of land use and land cover in global environmental change [J]. *Land Degradation and Development*, 1994, 5(2): 71-78.
- [2] 周增荣, 黄金良, 周培. 土地利用系统转移分析方法及其应用[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2012, 7(4): 28-38.
- [3] 后立胜, 蔡运龙. 土地利用/覆被变化研究的实质分析与进展评述[J]. *地理科学进展*, 2004, 23(6): 96-104.
- [4] 段增强, 张凤荣, 孔祥斌. 土地利用变化信息挖掘方法及其应用[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(12): 60-66.
- [5] 朱会义, 李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J]. *地理学报*, 2003, 58(5): 643-650.
- [6] 刘盛和, 何书金. 土地利用动态变化的空间分析测算模型[J]. *自然资源学报*, 2002, 17(5): 533-540.
- [7] Zhang Honghui, Zeng Yongnian, Bian Ling, et al. Modelling urban expansion using a multi agent-based model in the city of Changsha[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(4): 540-556.
- [8] 邓楚雄, 谢炳庚, 李晓青, 等. 长沙市耕地集约利用时空变化分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(1): 230-237.
- [9] 张卢奔, 李满春, 周磊, 等. 基于信息熵和分形维数的长沙市土地利用结构变化分析[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2014, 37(4): 1-5.
- [10] 罗开盛, 李仁东. 长沙市近 10 a 土地利用变化过程与未来趋势分析[J]. *中国科学院大学学报*, 2014, 31(5): 632-639.
- [11] 陈永林, 谢炳庚, 李晓青, 等. 2003—2013 年长沙市土地利用变化与城市化的关系[J]. *经济地理*, 2015, 35(1): 149-154.
- [12] 刘纪远, 张增祥, 李秀彬, 等. 20 世纪 90 年代中国土地利用变化的遥感时空信息研究[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [13] 雷师. 中国中部和东南部城市土地利用变化对比研究[D]. 湖南湘潭: 湖南科技大学, 2014.
- [14] Zhang Yujia. Characterizing Land Changes over Several Points in Time[D]. Massachusetts: Clark University, 2011.
- ~~~~~
- (上接第 181 页)
- [21] 张伟, 李爱农. 基于 DEM 的中国地形起伏度适宜计算尺度研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2012, 28(4): 8-12.
- [22] Cliff A D, Ord J K. *Spatial Processes: Models & Applications*[M]. London: Taylor & Francis, 1981.
- [23] 孟斌, 王劲峰, 张文宗, 等. 基于空间分析方法的中国区域差异研究[J]. *地理科学*, 2005, 25(4): 11-18.
- [24] 谷建立, 张海涛, 陈家赢, 等. 基于 DEM 的县域土地利用空间自相关格局分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(23): 216-224.
- [25] 陈彦光. 基于 Moran 统计量的空间自相关理论发展和方法改进[J]. *地理研究*, 2009, 28(6): 1449-1463.
- [26] Li Hongfei, Calder C A, Cressie N. Beyond Moran's I: Testing for spatial dependence based on the spatial autoregressive model [J]. *Geographical Analysis*, 2007, 39(4): 357-375.
- [27] Anselin L. Local indicators of spatial association-LISA [J]. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2): 93-115.
- [28] 王康, 何俊仕, 于德浩, 等. 采用 ArcGIS 平台的地势起伏度自动提取技术研究[J]. *沈阳理工大学学报*, 2013, 32(2): 63-67.
- [29] 韩海辉, 高婷, 易欢, 等. 基于变点分析法提取地势起伏度: 以青藏高原为例[J]. *地理科学*, 2012, 32(1): 101-104.
- [30] 范鹏宇, 朱校娟, 郭啸川. 基于 DEM 的地形起伏度最佳计算尺度的研究: 以仙居县为例[J]. *地矿测绘*, 2016, 32(4): 36-38.
- [31] 王岩, 刘少峰. 基于 DEM 的青海贵德地区地形起伏度的研究[J]. *地质通报*, 2008, 27(4): 2117-2121.
- [32] 曹伟超, 陶和平, 孔博, 等. 基于 DEM 数据分割的西南地区地貌形态自动识别研究[J]. *中国水土保持*, 2011(3): 38-41.
- [33] 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.
- [34] 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): 57-59.