

基于变点分析法提取废弃采石场地形起伏度的方法

刘育成¹, 赵廷宁²

(1. 大连工业大学, 辽宁 大连 116034; 2. 北京林业大学 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 地形起伏度是废弃采石场水土保持治理和生态重建的重要地形指标之一。以 0.5 m, 0.7 m, 1 m, 1.5 m 等 12 种不同水平分辨率 DEM 为数据源, 采用 GIS 的窗口递增分析法和均值变点分析法对 12 种不同分辨率 DEM 的地形起伏度的最佳分析窗口进行了分析。结果表明: 12 种不同分辨率的最佳分析窗口都是为 9×9 网格, 相应地提取地形起伏度的最佳统计面积与其相应的水平分辨率关系比较密切, 呈幂函数的关系。以 0.5 m 水平分辨率的 DEM 数据提取地形起伏度的最佳分析窗口面积为 20.25 m^2 , 并计算出大于 5 m 地形起伏度的区域占总面积的 13.12%。均值变点分析法确定地形起伏度也同样适用于废弃采石场的地形分析。

关键词: 废弃采石场; DEM; 地形起伏度; 最佳统计单元

中图分类号: TD88

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)03-0269-05

Method for Extraction of Relief Amplitude of Abandoned Quarry Based on Change Point Method

LIU Yucheng¹, ZHAO Tingning²

(1. Dalian Polytechnic University, Dalian, Liaoning 116034, China; 2. Key Lab of Soil and Water Conservation and Desertification Combating of Ministry of Education, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The relief amplitude of abandoned quarry is one of the important terrain indexes of soil and water conservation management and ecological restoration in mining area. Twelve different levels of DEMs such as 0.5 m, 0.7 m, 1.0 m, 1.5 m and so on, were taken as the data sources. GIS's grid window increment analysis method and change point method were used for the analysis of the twelve different levels of DEMs to extract relief amplitude. The results showed that the optimum statistical unit was 9×9 grid. The relationship between the optimum statistical unit area of the relief amplitude and the corresponding resolution was relatively close, which could be described by a power function. The optimum statistical unit area of 0.5 m DEM relief amplitude was 20.25 m^2 . The relief amplitude greater than 5 m accounted for 13.12% of the total area. The change point method was used to determine the optimum statistical unit of the relief amplitude, which is also applicable to the terrain analysis of the abandoned quarry.

Keywords: abandoned quarry; DEM; relief amplitude; optimum statistical unit

地形起伏度是宏观描述地形变化的整体趋势,也是定量描述地貌形态的重要指标之一^[1]。近年来,利用数字高程模型(DEM)进行地形起伏度研究在各个学术应用流域越来越受到重视,侧重于地形起伏度对区域地质灾害评价和水土流失定量评价^[2-3]、地形起伏度对地区人口密度与人口分布影响^[4-5]、地形起伏度的不同算法对比^[6-7]、地形起伏度最佳分析区域及适宜计算尺度研究^[8-10]、地形起伏度与景观空间格局特征间关系^[11]等。而涉及废弃矿区这种特殊土地利用类型的地形起伏度研究相对较少。目前,地形破碎、地势高差变化大的废弃矿区生态恢复中有关水土流失评价中的地形因子比较单一,侧重于坡度、坡长、

坡向、海拔高度、沟道密度、流域面积等^[12-14],但国内外还没有一套完整的地形指标体系来对废弃矿区的水土流失评价。由于 DEM 提取的坡度已失去原来地貌学的意义^[15],区域性的地形起伏度在研究中能更好地分析地形地貌和小流域形态特征,地形起伏度分析与区域性滑坡发生和分布存在良好的相关性,并且与坡度分析是互相补充的^[2]。地形起伏度作为废弃矿区水土流失评价的地形因子,能够反映其土壤侵蚀特征。由于不同的研究目的和应用领域,地形起伏度在提取方法和表达方式等方面有一定的差异性。为此,本研究对地质灾害频繁发生和大量水土流失严重的废弃采石场地形起伏度进行提取和计算,并对其

不同分辨率 DEM 的起伏度进行对比分析, 研究结果不仅可为废弃矿区的水土流失评价提供准确依据, 还对废弃矿区的生态恢复和地质灾害评价中具有重要的指导意义。

1 研究区概况

本研究区是太行山北段东麓的典型废弃采石场, 位于北京市房山区(以北纬 $39^{\circ}40'23''$ 、东经 $115^{\circ}42'35''$ 为中心), 面积约为 39.6 hm^2 。属于暖温带半湿润、半干旱大陆性季风气候, 四季分明, 年平均气温 $4 \sim 11.7^{\circ}\text{C}$; 年均降水量分布不均, 主要集中在 6—8 月份, 多年平均降水量为 655 mm 。地貌类型是以华北低山丘陵区的石灰岩为主, 土壤是多砾石砂壤土, 大多是采石场废弃渣土。天然植被稀疏, 植被覆盖率低, 主要有狗尾草(*Setaria viridis* L. Beauv.)、高羊茅(*Festuca arundinacea*)、荆条(*Hibiscus syriacus* Linn.)、委陵菜(*Potentilla aiscolor* Bunge)等。

2 研究方法

2.1 数据来源

研究区数据是采用 Topcon 影像全站仪测量所得到的点数据, 通过 ArcGIS 10 将这些点数据导入, 在 Beijing1954 投影坐标系下将其转换为不规则三角网 TIN 格式, 通过与现场的比对和校正后再将 TIN 格式内插生成规则栅格 DEM。为了对比废弃采石场不同分辨率的地形起伏度, 因此, 再将 TIN 格式转换成 0.5 m 、 0.7 m 、 1.0 m 、 1.5 m 、 2.0 m 、 2.5 m 、 3.0 m 、 3.5 m 、 4.0 m 、 4.5 m 、 5.0 m 和 7.0 m 共 12 种水平分辨率的栅格 DEM。

2.2 数据方法

地形起伏度算法有好多种^[16], 常用的、计算方便的和比较流行的算法是局部高差法。利用 ArcGIS 10 的空间分析模块的邻域分析(Forcalrange 函数)来计算地形起伏度, 首先采用栅格窗口递增分析方法, 对提取不同分析窗口的地形起伏度进行统计分析确定最佳分析窗口, 最后根据最佳分析窗口面积计算出相应起伏度。其中, 最佳分析窗口面积大小是研究地形起伏度的关键因子^[8]。因此, 本文采用统计学上的均值变点分析法来确定地形起伏度随面积变化的 Logarithmic 曲线上由陡变缓的点。均值变点分析法的计算可以按照以下步骤来进行^[17]:

(1) 将每个 i 样本分成两段: $x_1, x_2, x_3, \dots, x_{i-1}$ 和 $x_i, x_{i+1}, x_{i+2}, \dots, x_N$, 其中 $i=2, 3, 4, \dots, N$, 分别计算每段样本的算术平均值 $\overline{X_{i1}}, \overline{X_{i2}}$, 并计算出其相应统计量。

$$S_i = \sum_{t=1}^{i-1} (x_t - \overline{X_{i1}})^2 + \sum_{t=i}^N (x_t - \overline{X_{i2}})^2 \quad (1)$$

$$\overline{X} = \sum_{t=1}^N \frac{x_t}{N} \quad (2)$$

$$S = \sum_{t=1}^N (x_t - \overline{X})^2 \quad (3)$$

(2) 根据式(1), (2)和(3)计算期望值: $E(S - S_i), i=1, 2, 3, \dots, N$ 。原始样本的统计量 S 与样本分段后的统计量 S_i 之间最大差值对应的点称为变点。本文所用样本是指不同分析窗口面积下对应的地形平均起伏度值。

3 结果与分析

3.1 不同分辨率下小流域形态的起伏特征对比

从小流域地貌形态特征来看, 高程和坡度是影响其形态要素起伏特征的关键因子^[18], 也是基本反映了小流域内地貌形态在垂直方向的高差和径流的过程及变化。因此, 对 0.5 m 、 0.7 m 、 1 m 、 1.5 m 等 12 种不同分辨率下的小流域面积、高程平均值、高程标准差和平均坡度进行计算统计分析, 其结果见表 1。从表 1 可看出, 随着栅格尺寸的逐渐增大, 流域面积呈现出降低的趋势, 其变化范围为 $0.57\% \sim 2.66\%$; 不同栅格尺寸提取的小流域面积平均值为 36.49 hm^2 , 标准差 1.76 。从表 1 中的高程平均值来看, 不同分辨率下的高程平均值变化不显著; 随着栅格尺寸增大, 高程标准差变化总体也是不明显, 变化范围为 $0\% \sim 0.06\%$ 。对于不同分辨率下的坡度提取都是在 3×3 窗口中进行的, 随着栅格尺寸的变大, 从表 1 得出平均坡度呈现递减趋势, 其算术平均值为 23.84° , 标准差为 1.13 , 最大偏差为 0.93° , 变化范围为 $0.28\% \sim 4.10\%$ 。分析以上产生原因, 主要是废弃采石场地形复杂多变, 随着栅格尺寸的变大而分辨率的降低, 小流域的一些地形特征被平坦化, 导致提取的小流域面积、高程平均值和平均坡度随着栅格尺寸变化而变化。

3.2 不同分辨率下地形平均起伏度与网格单元面积关系

本文采用 ArcGIS 栅格窗口递增分析方法, 对 0.5 m 、 0.7 m 、 1 m 、 1.5 m 等 12 种不同分辨率下研究区的 DEM, 采用矩形窗口分析并依次提取 2×2 、 3×3 、 4×4 、 \dots 、 22×22 网格下地形起伏度, 并统计出其最佳分析窗口面积。以分辨率为 0.5 m 的 DEM 数据为例, 提取不同窗口下的地形平均起伏度, 见表 2。

从表 2 可以得出, 随着网格尺寸增大, 地形平均起伏度值也逐渐增大。对地形平均起伏度和分析窗口面积进行分析, 发现二者之间存在对数函数关系, 得出拟合曲线为:

$$y = 1.4819 \ln(x) - 0.7759 \quad (R^2 = 0.9351) \quad (4)$$

从式(4)来看, 0.5 m 分辨率下提取地形起伏度与分析窗口面积之间有良好的拟合效果, 通过统计学

的检验。

同理,对其他 11 种不同分辨率下 DEM 数据,分别提取不同分析窗口下的地形起伏度,并对地形平均起伏度与分析窗口面积进行分析,也都存在着对数函数关系,并都通过统计学检验,其相应曲线函数拟合效果良好,如图 1 所示。

表 1 不同分辨率提取 DEM 的小流域面积、高程和平均坡度

| 栅格大小/m | 0.5 | 0.7 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 7.0 |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 小流域面积/hm ² | 39.58 | 38.59 | 38.37 | 37.57 | 36.95 | 36.49 | 35.99 | 35.62 | 35.33 | 34.96 | 34.69 | 33.77 |
| 高程平均值/m | 179.05 | 179.08 | 179.08 | 179.09 | 179.09 | 179.08 | 179.08 | 179.09 | 179.09 | 179.07 | 179.05 | 179.09 |
| 高程标准差 | 35.20 | 35.21 | 35.20 | 35.20 | 35.20 | 35.20 | 35.19 | 35.21 | 35.19 | 35.18 | 35.22 | 35.21 |
| 平均坡度/(°) | 25.48 | 25.12 | 25.05 | 24.66 | 24.32 | 23.98 | 23.67 | 23.39 | 23.16 | 22.89 | 22.66 | 21.73 |

表 2 分辨率为 0.5 m 的地形平均起伏度与栅格单元对应关系

| 网格大小 | 面积/m ² | 平均起伏度/m | 网格大小 | 面积/m ² | 平均起伏度/m | 网格大小 | 面积/m ² | 平均起伏度/m | 网格大小 | 面积/m ² | 平均起伏度/m |
|------|-------------------|---------|-------|-------------------|---------|-------|-------------------|---------|-------|-------------------|---------|
| 2×2 | 1.00 | 0.45 | 7×7 | 12.25 | 2.40 | 12×12 | 36.00 | 4.12 | 17×17 | 72.25 | 5.70 |
| 3×3 | 2.25 | 0.87 | 8×8 | 16.00 | 2.76 | 13×13 | 42.25 | 4.44 | 18×18 | 81.00 | 6.00 |
| 4×4 | 4.00 | 1.27 | 9×9 | 20.25 | 3.11 | 14×14 | 49.00 | 4.76 | 19×19 | 90.25 | 6.30 |
| 5×5 | 6.25 | 1.66 | 10×10 | 25.00 | 3.45 | 15×15 | 56.25 | 5.08 | 20×20 | 100.00 | 6.59 |
| 6×6 | 9.00 | 2.04 | 11×11 | 30.25 | 3.78 | 16×16 | 64.00 | 5.39 | 21×21 | 110.25 | 6.89 |

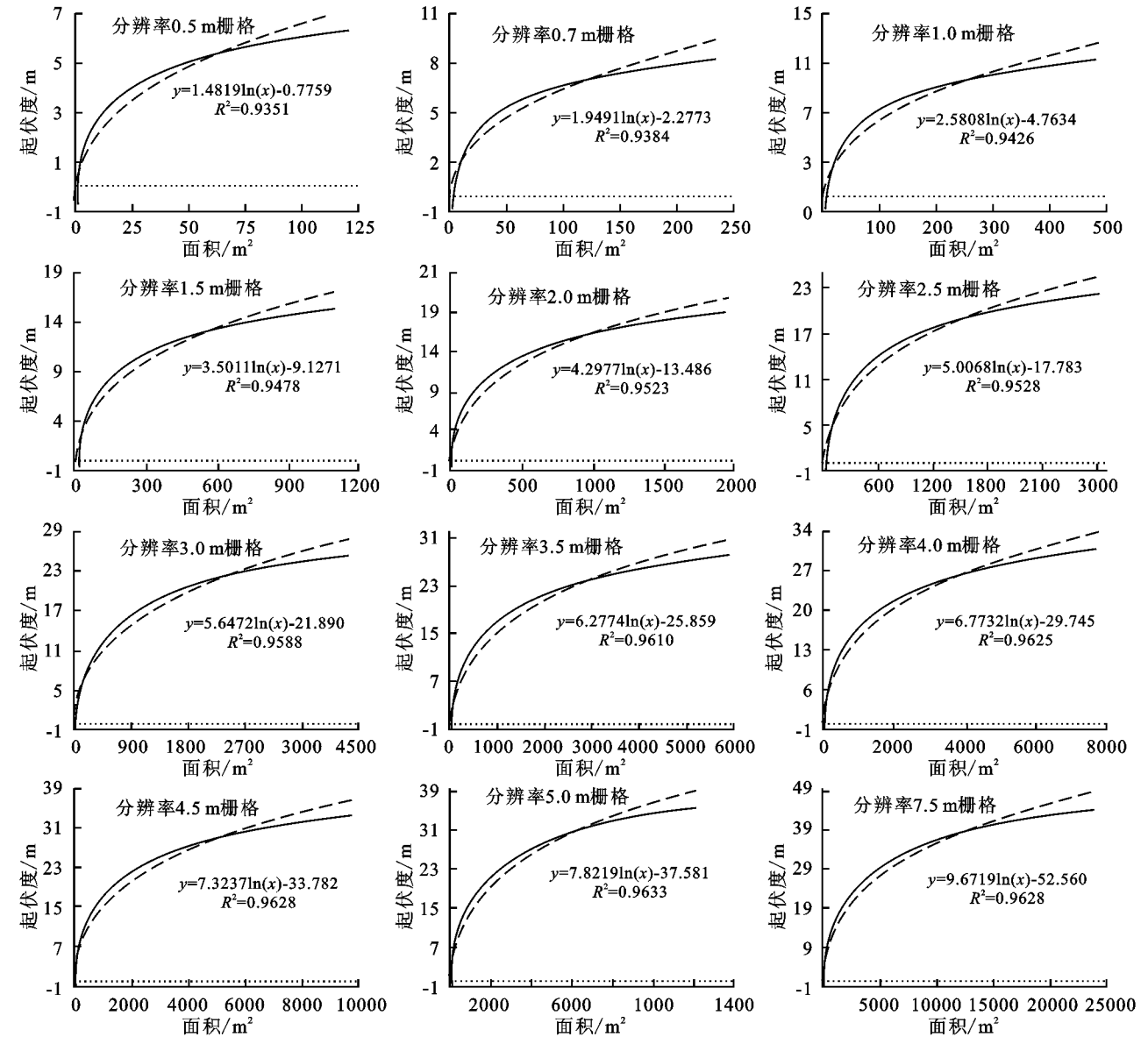


图 1 不同分辨率下网格单元面积与地形平均起伏度对应关系拟合曲线

3.3 均值变点分析法下不同分辨率的最佳分析面积

根据式(1),(2)和(3)分别计算出 12 种不同分辨率下的分段统计量 S 和 S_i ,通过 $S-S_i$ 的值确定出陡缓变化的拐点,即为最佳分析面积所对应的网格窗口的点。以分辨率为 0.5 m 的 DEM 数据为例,对表 2 数据计算出单位面积的地形平均起伏度(表 3),并取相应对数构建新样本序列 $X(X=\{x_i, i=2, 3, 4, \cdots, 22\})$ 。按照均值变点分析方法,利用式(1),(2)和(3)统计出 S 的值 7.675, S_i 的值见表 3。从表 3 中 i 和 $S-S_i$ 差值的变化得出曲线,如图 2(左上面第一个)所示。从图 2 得出 9×9 网格为最佳分析窗口,因此本研究区的分辨率为 0.5 m 时,地形起伏度的最佳分析面积为 20.25 m^2 。

同理,根据图 1 中数据对其他 11 种分辨率下的最佳分析面积进行统计分析, S 与 S_i 差值的变化拟合曲线见图 2。从图 2 明显看出,0.5 m,0.7 m,1 m,1.5 m

等 12 种不同分辨率下的 S 和 S_i 差值达到最大的点,都是在第 8 个点,其对应的分析窗口为 9×9 网格。因此废弃研究区提取地形起伏度的最佳统计面积与其相应的分辨率关系比较密切,呈幂函数的关系。

表 3 分辨率为 0.5 m 的均值变点分析的统计结果

| i | R_i | S_i | i | R_i | S_i |
|-----|-------|-------|-----|-------|-------|
| 2 | 0.451 | 6.058 | 13 | 4.441 | 2.482 |
| 3 | 0.872 | 4.675 | 14 | 4.761 | 2.815 |
| 4 | 1.273 | 3.637 | 15 | 5.077 | 3.204 |
| 5 | 1.660 | 2.896 | 16 | 5.389 | 3.644 |
| 6 | 2.035 | 2.397 | 17 | 5.696 | 4.126 |
| 7 | 2.400 | 2.092 | 18 | 5.999 | 4.646 |
| 9 | 2.757 | 1.947 | 19 | 6.299 | 5.200 |
| 10 | 3.106 | 1.934 | 20 | 6.594 | 5.783 |
| 11 | 3.448 | 2.029 | 21 | 6.886 | 6.391 |
| 12 | 4.115 | 2.217 | 22 | 7.175 | 7.606 |

注: i 为变点数; R_i 单位面积上的地形平均起伏度; S_i 样本分段后统计量。

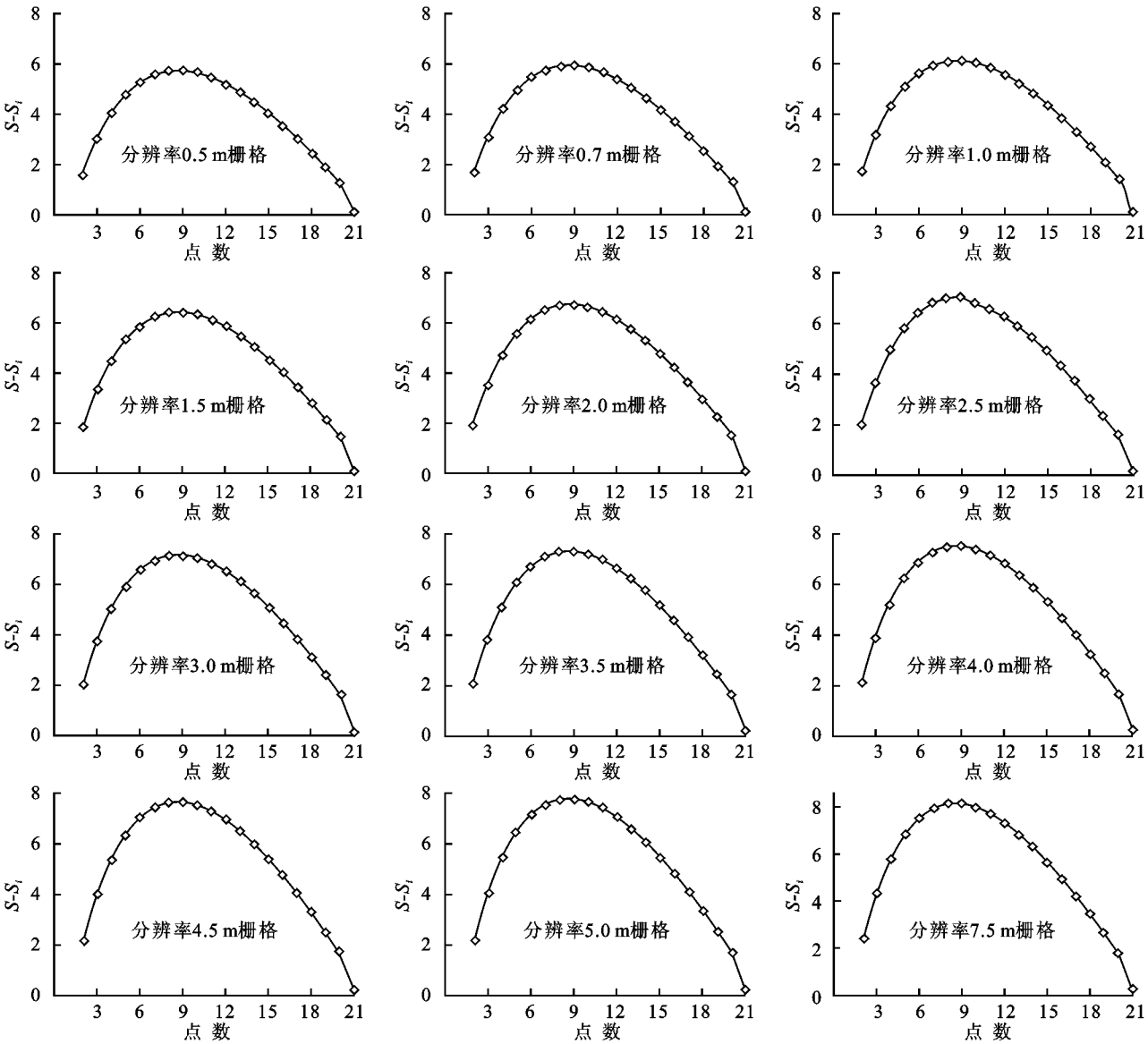


图 2 不同分辨率下 S 和 S_i 差值的变化曲线

根据表1和表3的结果,研究区地形起伏度研究采用分辨率为0.5 m的DEM数据、最佳分析面积为20.25 m²,其具体分级见图3。从图3计算出地形起伏度,大于5 m的所占百分比为13.12%,是水土流失最严重的区域,也是后期废弃采石场土地复垦治理的重点区域;在3~5 m之间所占百分比为16.52%,在1~3 m之间所占百分比为51.01%,在0~1 m范围内所占总面积的19.35%。根据不同地形起伏度和废弃采石场复绿规划,采取相应的水土保持措施。

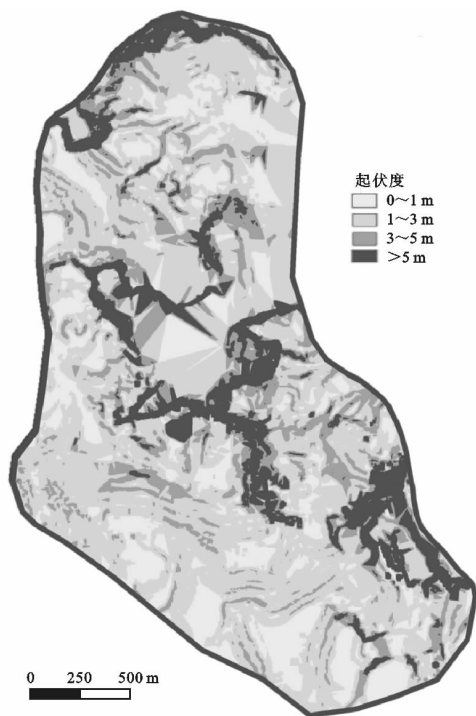


图3 分辨率为0.5 m的地形起伏度分级

4 结论

(1) 对0.5 m, 0.7 m, 1 m, 1.5 m等12种不同水平分辨率下小流域形态要素的起伏特征如流域面积、平均高程值、程标准差和平均坡度等进行计算和比较。小流域面积随着栅格尺寸增大而呈现出降低的趋势,变化范围为0.57%~2.66%。平均高程对12种不同分辨率没有显著影响。平均坡度随着栅格尺寸增大而逐渐降低,变化范围为0.28%~4.10%。

(2) 0.5 m, 0.7 m, 1 m, 1.5 m等12种不同分辨率下的最佳分析窗口是9×9网格,相应地提取地形起伏度的最佳统计面积与其相应的分辨率关系比较密切,呈幂函数的关系。

(3) 对废弃采石场的分辨率为0.5 m的DEM数据进行提取地形起伏度,其统计最佳分析面积为20.25 m²,统计出地形起伏度大于5 m的区域占总面积的13.12%,也是水土流失治理重点区域;在3~5 m

之间所占百分比为16.52%,在1~3 m之间所占百分比为51.01%。

(4) 地形起伏是导致水土流失的最直接原因,因此针对废弃矿山生态修复或工程绿化规划和设计常用的水平分辨率,提出比较或最适宜分析地形起伏度的方法。

参考文献:

- [1] 涂汉明,刘振东.中国地形起伏度研究[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] 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.
- [4] 封志明,唐焰,杨艳昭,等.中国地形起伏度及其与人口分布的相关性[J].地理学报,2007,62(10):1073-1082.
- [5] 周自翔,李晶,任志远.基于GIS的关中一天水经济区地形起伏度与人口分布研究[J].地理科学,2012,32(8):951-957.
- [6] 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.
- [7] 蒋好忱,杨勤科.基于DEM的地形起伏度算法的比较研究[J].水土保持通报,2014,34(6):162-166.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 陈学兄,常庆瑞,郭碧云,等.基于STRM DEM数据的中国地形起伏度分析研究[J].测绘科学技术学报,2013,21(4):670-678.
- [11] 赵卫权,苏维词,袁俊.基于地形起伏度的贵州省景观空间格局分异特征[J].水土保持研究,2010,17(2):105-110.
- [12] 杨翠霞.露天开采矿区废弃地近自然地形重塑研究[D].北京:北京林业大学,2014.
- [13] 吕春娟,白中科,陈卫国,等.黄土区露天矿排土场水分调控技术研究[J].水土保持通报,2011,31(1):160-164.
- [14] 杨翠霞,赵廷宁,谢宝元,等.基于流域自然形态的废弃矿山地形恢复模拟[J].农业工程学报,2014,30(1):236-244.
- [15] Tomislav H, Hannes I, Reuter. Geomorphometry Concepts, Software, Applications[M]. Amsterdam: Elsevier, 2009.
- [16] Tang Guoan. A Research on the Accuracy of Digital Elevation Models [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [17] 项静恬,史久恩.非线性系统中数据处理的统计方法[M]:北京:科学出版社,2000.
- [18] 承继成,江美球.流域地貌数学模型[M].北京:科学出版社,1986.