

文章编号: 1008-2786-(2018)6-964-09

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000391

黄土丘陵沟壑区坡度尺度效应空间分异分析

土 祥, 王春梅*, 庞国伟, 杨勤科, 温伯清

(西北大学 城市与环境学院, 西安 710127)

摘 要: 基于 DEM 提取的地形因子随分辨率变化问题(尺度效应)受到广泛关注, 不同地貌类型区地形因子随分辨率变化规律存在差异, 其差异的机理性原因还有待进一步探讨。本研究以黄土丘陵沟壑区五个副区为研究区, 统计了不同地貌类型区坡度随分辨率变化规律, 计算了高程变异函数, 并引入独立结构变异函数模型(Independent Structures Model, ISM)拟合了高程表面不同空间频率层次, 分析了地形空间频率层次在黄土丘陵沟壑区的空间分异规律, 从而进一步分析坡度随分辨率变化规律与地形空间频率层次之间的关系。研究表明: 平均坡度相近的地区坡度随分辨率变化规律并不相同, 高频地形信息存在与否及其所占比重, 是决定一个地区坡度随分辨率变化衰减程度的重要因素, 在坡度随分辨率变化衰减程度和坡度尺度变换研究及应用中应考虑研究区内地形空间频率组成情况, 这对于丰富和完善数字地形分析理论体系具有重要意义。

关键词: DEM; 坡度尺度效应; 地统计学; 地形空间频率; 独立结构变异函数模型

中图分类号: P91

文献标志码: A

地形表达的准确性与地形因子提取精度受 DEM 分辨率影响较大, 从而影响了地表过程的模拟精度^[1-5]。在诸多地形因子中, 坡度是多种地表过程中最重要的地形因子之一^[6-8]。在坡面尺度上, 坡度可以通过实测来获得, 而在宏观尺度上, 坡度只能基于中低分辨率 DEM 来提取^[9, 10]。坡度随分辨率变化的尺度效应问题受到了地学工作者的广泛关注。研究发现随着分辨率降低坡度最大值明显降低^[11], 平均坡度随分辨率降低呈线性衰减^[12], 坡度随分辨率变化向中等坡度集中, 即陡坡减少, 缓坡先减少后增加^[13]; 也有研究认为坡度随分辨率降低呈对数衰减, 并发现在黄土丘陵沟壑区沟沿线上坡度变化更为剧烈, 而在分水线、流水线上坡度变化较缓

慢^[14]。研究者还发现复杂地貌类型区坡度随分辨率的衰减程度大于简单地貌类型区^[15]。以上研究多侧重于坡度随分辨率变化基本规律的统计, 而对其变化规律的机理探讨不足。

同时, 有学者关注到 DEM 分辨率与栅格尺寸二者是不同的^[16], 从而关注到 DEM 分辨率影响坡度的两种基本方式, 分别为栅格尺寸的改变和平滑作用^[17]。研究认为地形组成较为简单的地区 DEM 栅格尺寸的改变对坡度的影响较大, 在地形组成较复杂的地区平滑作用影响更大^[11, 18], 但仍未涉及坡度尺度效应差异机理的探讨。而在对坡度尺度效应的机理研究方面, 有学者认为坡度尺度效应是由于高频地形信息的损失导致^[19]。然而对不同地貌类型

收稿日期(Received date): 2018-04-28; **改回日期**(Accepted date): 2018-10-16

基金项目(Foundation item): 国家重点研发计划项目(2017YFD0800500); 国家自然科学基金(41371274, 41601290, 41301284)。[National Key Research and Development Program of China (2017YFD0800500); National Natural Science Foundation of China (41371274, 41601290, 41301284)]

作者简介(Biography): 土祥(1993-), 男, 陕西省咸阳市人, 硕士研究生, 主要研究方向为数字地形分析与 GIS 应用。[TU Xiang (1993-), male, born in Xianyang, Shaanxi province, M. Sc. candidate, research on digital terrain analysis and GIS application] E-mail: tuxiang1993@126.com

* **通讯作者**(Corresponding author): 王春梅(1983-), 女, 山东省德州市人, 博士, 副教授, 主要研究方向为侵蚀地形分析。[WANG Chunmei (1983-), female, Ph. D., associate professor, research on soil erosion assessment based on remote sensing and GIS] E-mail: cmwang@nwu.edu.cn

区坡度尺度效应差异性机理尚未给出明确解释与定量分析。

基于此,本研究在统计不同地貌类型区坡度随分辨率变化特征的基础上,应用地统计分析方法,得到不同地貌类型区地形空间频率层次组成,研究不同空间频率组成条件下坡度尺度效应的空间分异,从而量化坡度随分辨率变化程度与地形特征之间的关系,进而剖析坡度尺度效应空间分异机理性规律。以期深化坡度尺度效应研究,并在一定程度上丰富数字地形分析理论体系。

1 数据与方法

1.1 研究区与数据

黄土丘陵沟壑区水土流失严重,是土壤侵蚀领域研究的热点区域。黄秉维先生于1955年根据黄土丘陵区的地形、植被和气候等因素,将黄土丘陵沟壑区划分为五个副区^[20],分别为黄土丘陵第Ⅰ副区、黄土丘陵第Ⅱ副区、黄土丘陵第Ⅲ副区、黄土丘陵第Ⅳ副区、黄土丘陵第Ⅴ副区(简称第Ⅰ副区至

第Ⅴ副区)。本研究在以上五个副区各选取一个样区作为研究区(图1a),每个样区均为包含一个完整流域的10 km×10 km正方形区域。第Ⅰ副区和第Ⅱ副区平均坡度最大,区内均梁峁起伏、地形最为破碎,其中第Ⅰ副区以峁状丘陵为主,第Ⅱ副区以梁状丘陵为主;第Ⅲ副区和第Ⅳ副区地形相对平缓,第Ⅲ副区以缓坡长梁宽谷丘陵为主;第Ⅳ副区以黄土长梁丘陵为主;第Ⅴ副区总体坡度最小,其地形特征为黄土梁峁与黄土盆地、沿河阶地的组合(图1b-f)。

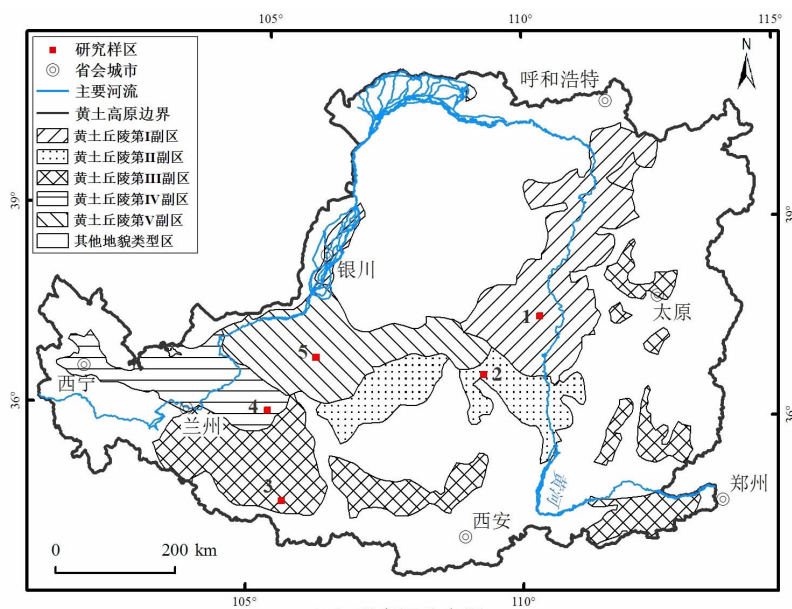
研究采用的基础数据为1:10 000和1:50 000数字地形图(DLG),包括等高线、高程、水系、湖泊等组成部分。利用ANUDEM软件^[21]插值生成各样区不同分辨率DEM,并通过ArcGIS10.2软件算取其坡度数据。

1.2 研究方法

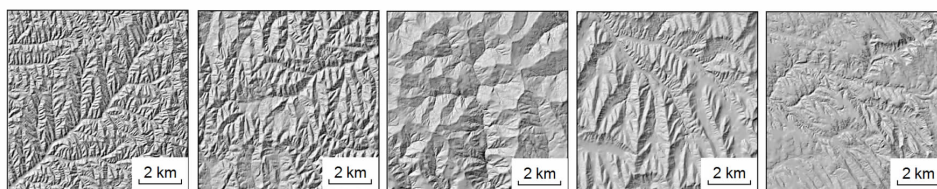
1.2.1 平均坡度随分辨率变化规律统计方法

为统计不同地貌类型区平均坡度随分辨率变化的规律,研究引入平均坡度变率^[22], (DEM分辨率每降低1 m平均坡度的衰减值),其计算表达式为:

$$\rho = \frac{S_2 - S_1}{\omega} \quad (1)$$



(a) 研究区分布图



(b) 第Ⅰ副区

(c) 第Ⅱ副区

(d) 第Ⅲ副区

(e) 第Ⅳ副区

(f) 第Ⅴ副区

图1 研究区分布及样区山体阴影表面

Fig. 1 Location and hillshade of the study area

式中, S_1 、 S_2 为不同分辨率 DEM 的坡度平均值, 单位为度, ω 为 DEM 分辨率变化量, 单位为米。

1.2.2 基本变异函数模型与独立结构变异函数模型

为了解区域化变量的变异特征, 需对变异函数进行模拟, 得到理论模型及模型中的重要参数 (包括变程值、基台值、块金系数)。目前比较成熟的变异函数理论模型有 Gauss 模型、球状模型、指数模型等^[23]。Goodvaerts^[24] 和 Oksanen^[25, 26] 等认为对于地形分析 Gauss 模型是比较适用的模型。本研究中采用 Gauss 模型对变异函数进行拟合, 得到了较好的拟合结果。

Gauss 模型的一般公式如下:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C(1 - e^{-(h/a)^2}) & h > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\gamma(h)$ 为变异函数理论模拟值, h 为空间两点之间的距离; C_0 是块金值, 在本研究中块金值为 0; C 指变异函数基台值, 当 $h = \sqrt{\pi}a$ 时, $\gamma(h) \approx C$ 达到基台值, 所以变异函数的变程值为 $\sqrt{\pi}a$ ^[23]。

地形的空间结构相当复杂, 组成一个地区的流域发育规模不一, 单一的变异函数拟合模型不能较合理地拟合地形不同空间频率的结构特征。遥感数字图像处理领域中空间频率指地物在影像中相同或相似纹理重复出现的状态和变化的频繁程度^[27]。在 DEM 数据中, 规模较小的流域在一定范围内出现次数较多、在空间上变化较快, 为高频信息; 规模较大的流域在一定范围内出现次数较少、在空间上变化较慢, 为低频信息。研究中应用了独立结构变异函数模型 (Independent Structures Model, ISM)^[4, 19] 来表达不同空间频率的地形特征。王春梅等在实验中验证了变异函数变程值与实际地形流域平均宽度的一半具有良好的对应关系, 即 ISM 模型每一频率层对应不同的流域级别^[19]。其表达式如下:

$$Z(x) = \sum_{j=1}^n \sigma_j \gamma_j(x) \quad \sigma_z^2 = \sum_{j=1}^n \sigma_j^2 \quad (3)$$

其中: $Z(x)$ 为区域化变量, 这里指地表高程变量; σ_j 为第 j 个空间频率层次的标准差; σ_z^2 为区域化变量的方差; σ_j^2 为第 j 个空间频率层次的方差。在此模型中, 假定区域化变量 $Z(x)$ 是由 n 个相互独立的组分 $\gamma_j(x)$ 和一个区域均值组成, 各个组分均值为零且具有各自的方差 σ_j^2 。各组分方差 σ_j^2 的加和为区域变量的总方差 σ_z^2 。

$$C_z(h) = \sum_{j=1}^n \sigma_j^2 C_j(h) \quad (4)$$

$$\gamma_z(h) = \sum_{j=1}^n \sigma_j^2 \gamma_j(R_j; h) = \sum_{j=1}^n \sigma_j^2 (1 - C_j(h)) \quad (5)$$

$C_z(h)$ 为区域化变量 Z 的协方差函数; $C_j(h)$ 为第 j 个空间频率层次的协方差函数值; $\gamma_z(h)$ 为区域化变量 Z 的变异函数; R_j 为第 j 个空间频率层次的变程相关参数值; $\gamma_j(R_j; h)$ 为第 j 个空间频率层次在距离为 h 处的变异函数值。

在上式中, 每个组分协方差函数 $C_j(R_j; h)$ 对应于每个分量 $Y_j(x)$ 和 $C_j(R_j; 0) = 1$ 。假设分量的变程相关参数值“ R ”被排序为: $0 < R_1 < R_2 < R_3 \cdots < R_N$, 这表示第一个组分是具有最多“细节”或高空间频率信息的组分, 最后一个组分是具有最低频率或区域信息的组分。

研究中选择了二维 Gauss 模型, 以适应 DEM 的实验半变异函数。Gauss 模型表达式为:

$$\gamma_j(h) = \sigma_j^2 (1 - e^{-(h/R_j)^2}) \quad h \geq 0 \quad (6)$$

$$C_j(h) = e^{-(h/R_j)^2} \quad (7)$$

$$Range = R_j \times \sqrt{\pi} \quad (8)$$

$$Sill = \sigma_j^2 \quad (9)$$

其中: $\gamma_j(h)$ 为第 j 个空间频率层次的变异函数, $Range$ 为变程值, $Sill$ 为基台值。

1.2.3 流域宽度统计方法及模型精度评价

流域形状为不规则多边形, 其流域宽度上中下游宽度不一致, 本研究中统计了流域的平均宽度, 平均宽度计算公式定义如下:

$$W_{ave} = \frac{S}{L} \quad (10)$$

W_{ave} 是流域平均宽度 (m), S 是流域面积 (m^2), L 为流域出水口与沟头之间的长度 (m)。

由公式 (2) 可知, 变异函数的变程值为 $\sqrt{\pi}a$, 其表达的含义为变异函数值达到基台值时的空间距离, 而该空间距离与研究流域的实际流域平均宽度的一半具有一定的对应关系。变程值与流域平均宽度的一半的匹配精度用 D 表示:

$$D = \left(1 - \frac{|R - h|}{R}\right) * 100\% \quad (11)$$

式中: R 为流域平均宽度的一半, h 为变程; D 越接近于 100%, 表明模型拟合结果与实际地形特征对应程度越好。

应用模型有效性系数 (The model efficiency coefficient, ME) 来评价 ISM 模型拟合的精度。ME 的计算公式如下^[4]:

$$ME = 1 - \frac{\sum (Y_{obs} - Y_{pred})^2}{\sum (Y_{obs} - Y_{mean})^2} \quad (12)$$

其中: ME 为模型有效性系数, Y_{obs} 为基于 DEM 计算的变异函数值, 定义为实际值 (即结果 2.2 中的实际值), Y_{pred} 为通过 ISM 模型拟合后的值 (即结果 2.2 中的模拟值), Y_{mean} 为实际值的平均值, ME 变化区间为 $-\infty$ 到 1, ME 越接近 1 表示模型的拟合效果越好。

1.2.4 实验过程及技术路线

在第 I 至第 V 副区, 基于各研究样区 1:50 000 数字地形图 (DLG) 通过 ANUDEM 插值算法生成各样区的系列分辨率 DEM, 并计算坡度, 统计各样区不同分辨率平均坡度值, 并计算不同地貌类型区的平均坡度变率; 基于 1:50 000 DLG 生成各样区 10 m 分辨率 DEM, 通过 IDL 程序计算 10 m 分辨率 DEM 变异函数, 拟合地形空间频率层次; 以第 I 副区为重点研究样区, 基于该样区于 1:10 000 DLG 生成 2.5 m 和 25 m 分辨率 DEM, 计算并拟合变异函数, 从而分析其地形空间频率层次并研究随着分辨率的降低地形空间频率层次的变化特征。基于以上分析阐明坡度随分辨率的变化规律与其地形空间频率层次之间的关系。技术流程如图 2 所示。

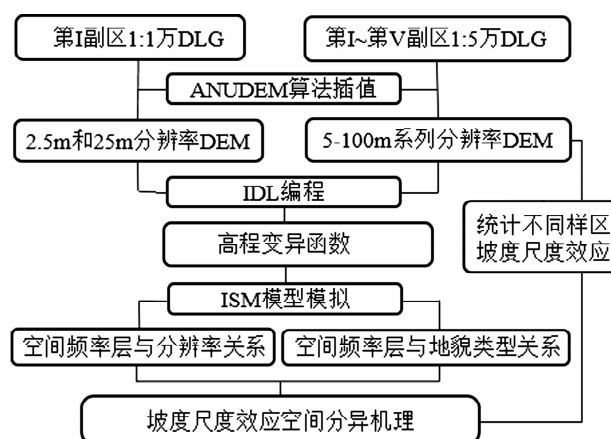


图2 技术流程图

Fig. 2 Technical flow chart

副区平均坡度衰减迅速, 第 II 副区次之。第 III 副区、第 IV 副区和第 V 副区平均坡度衰减较为缓慢, 且下降速率相近。当分辨率降低至 100 m 时, 各样区平均坡度排序为第 III 副区 > 第 II 副区 > 第 IV 副区 > 第 I 副区 > 第 V 副区。图 3b 为各样区平均坡度变率, 在 5 ~ 30 m 分辨率区间平均坡度衰减变化率不断增加, 25 ~ 30 m 分辨率间变化速率达到峰值, 第 I 副区坡度变率值最高, 第 II 副区次之, 其余样区相差不大。坡度变化率曲线达到峰值后逐渐降低, 峰值出现在 20 ~ 35 m 分辨率之间, 5 个样区在 20 ~ 35 m 分辨率之间坡度衰减最为剧烈。

2.2 不同地貌类型区地形表面空间频率特征分析

根据公式 2, 基于 5 个样区 10 m 分辨率 DEM 计算高程变异函数, 利用 ISM 模型将各样区按照空间频率层次进行分层拟合, 当拟合精度 ME (公式 12) 达到 0.99 时, 认为拟合层数达到最优, 假如某一样区拟合层数为 n 时, 则每一空间频率层依次记为

2 结果与分析

2.1 坡度随分辨率变化的空间分异特征

统计各样区平均坡度和平均坡度变率 (公式 1) 可以看出, 随着分辨率的降低, 各个样区的平均坡度均逐渐降低 (图 3a), 平均坡度变率也呈规律性变化 (图 3b)。图 3a 表明在分辨率为 5 m 时, 第 I 副区和第 II 副区平均坡度最大, 随着分辨率的降低, 第 I

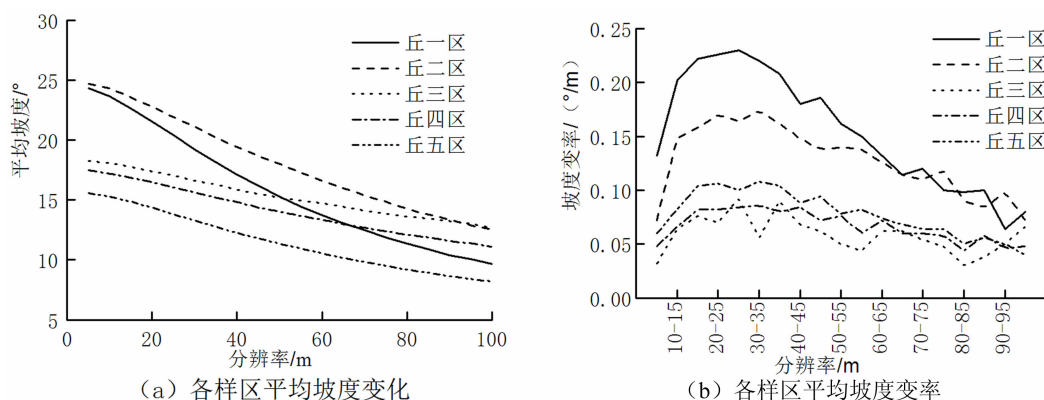
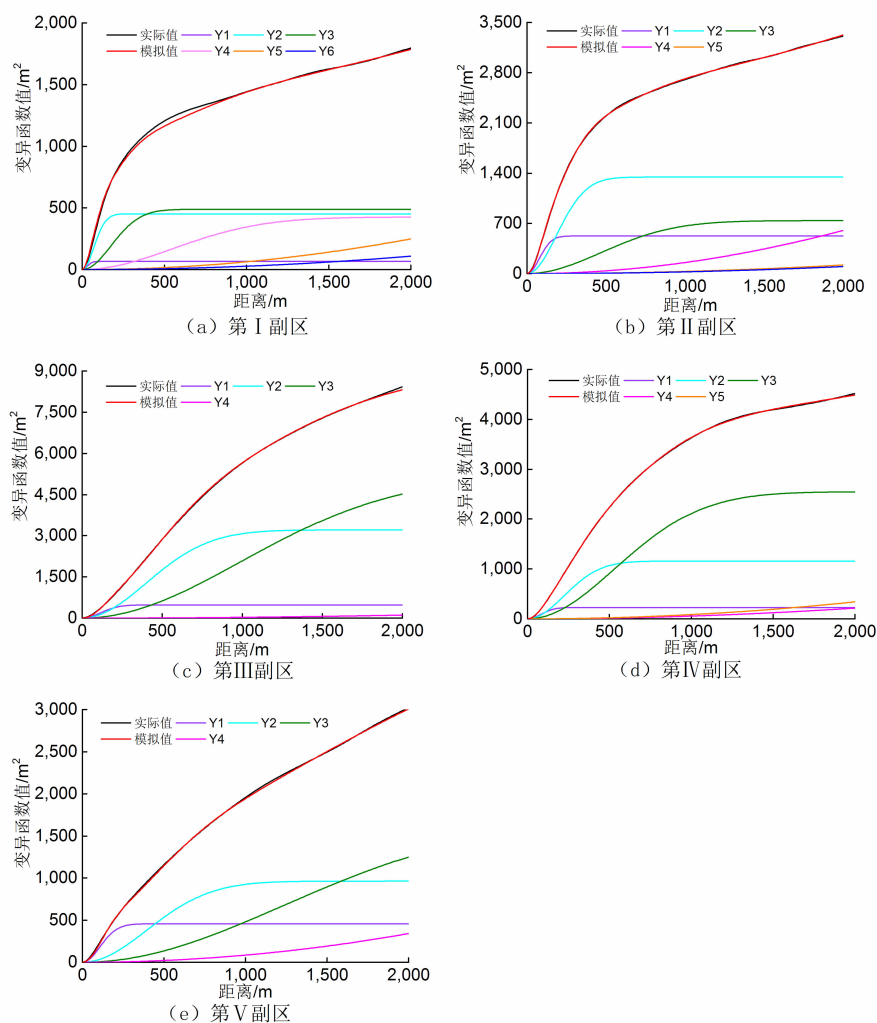


图3 各样区平均坡度与平均坡度变率

Fig. 3 Mean slope and slope average variability of each study area

$Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$, Y_1 代表该样区地形中最为细碎、空间频率最高的部分, Y_2 相较于 Y_1 地形细碎程度有所降低, Y_3 相较于 Y_2 次之, 依次类推至 Y_n 。图 4 为各样区基于 ISM 模型的地形频率分层图, 通过实验分析发现, 第 I 副区拟合为 6 层, 第 II 副区和第 IV 副区拟合为 5 层, 第 III 副区和第 V 副区拟合为 4 层。从模型参数来看 (表 1), 第 I 副区包含的有效地形频率层数为 4 层, 其他样区为 3 层。模型参数中各频率层次的变程值可反映一个样区地形破碎的程度。第 I 副区有效频率组分变程值分别约为 75 m、177 m、439 m 和 1374 m, 是最为破碎的样区; 第 II 副区相比第 I 副区在最高频率组分缺失, 其他

组分接近; 第 III 副区最高频率组分的变程值在五个样区中最大, 代表第 III 副区地形相对较为完整; 第 IV 副区和第 III 副区较接近, 但各层变程值较第 III 副区小, 代表其地形表面较第 III 副区破碎; 第 V 副区在最高频率组分变程值较小, 代表最细小的地形信息层占一定比重, 其余两层信息与第 IV 副区相似。基台值可表征每个频率组分的信息量。在有效频率组分中, 第 I 副区变程值分别为 177 m、439 m 和 1374 m 的三个组分基台值较为接近, 且都占较大比重; 第 II 副区中基台值最高的频率层次变程值为 465 m; 第 III 副区为 2476 m; 第 IV 副区为 1335 m; 第 V 副区为 1741 m (表 1)。



注: 实际值是对 DEM 直接计算的变异函数值, $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6$ 为通过 ISM 模型拟合的不同高程频率层次组分, 模拟值为各拟合频率层之和

Note: The actual value is the variogram value directly calculated by DEM. $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6$ are the different elevation frequency grading components fitted by the ISM model, and the simulated values are the sum of the fitting frequency layers.

图 4 各样区基于 ISM 模型的地形频率分层

Fig. 4 Different frequency levels in each study area based on ISM

表 1 各样区 ISM 模型拟合参数

Tab. 1 Parameters of ISM model in each study area

样区	参数	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6
第 I 副区	基台值/m ²	65.54	450.80	487.97	425.46	6564.42	1609901.8
	变程值/m	74.85	177.19	439.08	1374.11	18046.11	432186.85
第 II 副区	基台值/m ²	523.80	1343.83	737.51	8542.29	1609905.23	—
	变程值/m	193.35	464.90	1169.85	13124.38	410490.14	—
第 III 副区	基台值/m ²	478.27	3207.8	5190.5	1609901	—	—
	变程值/m	286.46	996.97	2476.1	432182.4	—	—
第 IV 副区	基台值/m ²	228.39	1156.45	2550.20	3103.11	1609904.53	—
	变程值/m	205.28	554.65	1335.21	13239.93	243702.17	—
第 V 副区	基台值/m ²	455.57	962.02	1705.80	1609903.73	—	—
	变程值/m	150.24	556.35	1741.57	137546.97	—	—

综合以上分析,第 I 副区高频层频率最高,包含的较小规模地形信息较丰富,地形表面最为复杂,第 II 副区次之;第 III 副区地形表面最为完整,第 IV 副区地形表面破碎程度中等,第 V 副区表现为较高频和较低频的组合,是一种在主流域两侧较破碎,而其他部位较为平缓、简单的地形的组合。

2.3 模型参数地学意义

ISM 模型中主要参数包括频率层次地形信息的变程值和基台值。变程值表征了空间上有关联的最远距离,在地形特征的模拟中,高程在完整流域范围内呈规律性变化,由沟谷底部到梁脊顶部逐渐增大,在本研究中变程值代表了该层次地形特征中的流域平均宽度的一半。变程越小,代表该层次地形越破碎,反之越完整。基台值表征了某一频率层次地形信息含量,基台值越大,代表该层次地形特征在研究区内分布越多。随着 DEM 分辨率的降低,较为破碎的地形特征被综合,模型参数拟合结果变程值增大,基台值减小。以下将定量分析模型参数与地形特征的对应关系及其随分辨率的变化规律。

2.3.1 空间频率层与实际地形关系分析

根据 ISM 拟合结果,理论上将第 I 副区地形表面分为 6 个空间频率层,其每层变程值应与实际流域平均宽度的一半有一一对应关系。基于 2.5m 分辨率 DEM 和 Strahler 河流分级方法^[28],提取不同级沟道,并划分了不同级别流域。随机选取不同级别流域,统计其流域平均宽度的一半(公式 10),由于 Y5 层为样区内骨架地形结构,Y6 层为样区内趋势性地形,未能进行有效统计,本研究统计了 Y1、Y2、Y3 和 Y4 层分别对应的实际流域平均宽度的一半。随机选取不同级别流域分布如图 5,统计实际流域平均宽度的一半及 2.5m 分辨率 DEM 各层拟合变程值(表 2)。表中结果显示,各组结果对应程度相对较好,只有 Y4 层匹配精度 D 值(公式 11)低于 95%,说明变异函数变程值与不同级别流域宽度具有良好的对应关系。

2.3.2 ISM 模型拟合参数与 DEM 分辨率关系

在第 I 副区基于 1:10000DLG 生成 2.5 m、25 m 分辨率 DEM,分别计算其变异函数(公式 2),之后

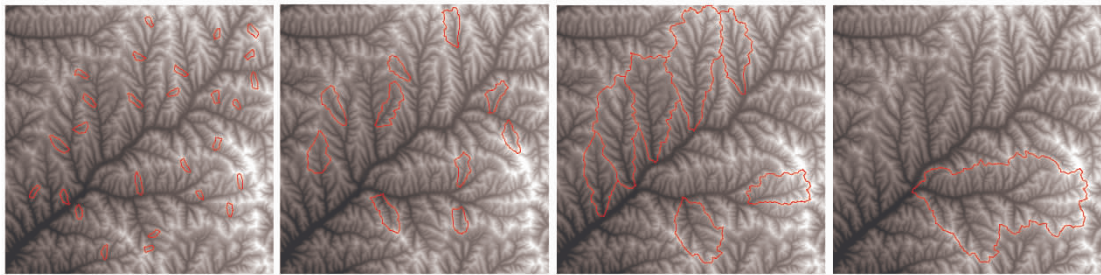


图 5 随机选取的不同级别的流域

Fig. 5 Watershed for varied order selected randomly

表 2 实际流域平均宽度的一半及各频率层变程值比较

Tab.2 Comparison of actual watershed half-width and range values in each frequency layer

	Y1	Y2	Y3	Y4
变程值/m	68.86	174.74	438.10	1373.80
实际半流域宽度/m	69.78	179.55	438.75	1102.21
匹配精度 D/%	98.68	97.32	99.85	75.36

利用 ISM 模型拟合最优空间频率层,表 3 为拟合参数,ME 模型有效性系数均在 0.99 以上。

表 3 显示了分辨率为 2.5 m 和 25 m 时不同频率层的变程值和基台值。分辨率从 2.5 m 降低至 25 m, Y1 组分的变程值增加了 45.2%,基台值下降了 31.1% (变化量为负表示减少,为正则表示增加);Y2 组分基台值和变程值变化量均在 10% 以内。对于 Y3, Y4, Y5 和 Y6 组分,基台值和变程值的变化量较小。在分辨率从 2.5 m 降低至 25 m 的过程中,地形信息的损失主要是 Y1 组分。

根据以上 ISM 拟合各空间频率层参数,采用普通克里金法 (Ordinary Kriging) 进行高程信息各组分表面的插值^[23] (图 6), Y1 到 Y5 表达的地形信息由高频到低频, Y5 表达了研究区地形的总体骨架。图中反映了随着 DEM 分辨率降低, Y1 组分信息损失明显; Y2、Y3、Y4 和 Y5 组分表面在分辨率降低过程中变化不大,为相对稳定的地形中低频组分。

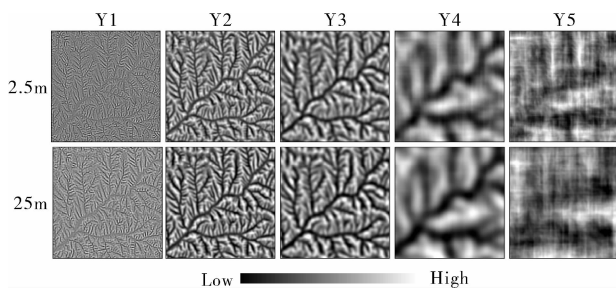


图 6 2.5 m 和 25 m DEM 分辨率分层克里金插值表面

Fig.6 Elevation surfaces by kriging interpolation with 2.5 m and 25 m resolution

表 3 不同分辨率 ISM 模型拟合参数

Tab.3 Parameters of ISM model with different resolution

参数	DEM	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6
基台值/m ²	2.5m	71.24	457.11	489.06	425.56	6564.42	1609901.69
	25m	49.07	422.24	482.51	424.97	6564.37	1609901.66
	变化量/%	-31.1	-7.6	-1.3	-0.1	0.0	0.0
变程值/m	2.5m	68.86	174.74	438.10	1373.80	18046.08	432186.85
	25m	99.96	189.17	444.05	1375.71	18046.23	432186.85
	变化量/%	45.2	8.3	1.4	0.1	0.0	0.0

3 结论与讨论

3.1 结论

本研究在第 I 至第 V 副区对坡度尺度效应的差异性进行了分析,对地形进行空间频率分层以区分高、中、低频地形信息,讨论了不同频率地形信息随分辨率的变化情况,从而得出高频信息的存在及其所占比重,是衡量一个地区坡度尺度效应程度的关键。主要结论如下:

(1)坡度随分辨率变化会发生明显衰减,分辨率在 20 ~ 35 m 时坡度衰减最为剧烈。在不同的地貌类型区,坡度尺度效应存在明显差异性,在地形表面最为破碎第 I 副区,坡度衰减最强烈,第 II 副区次之,其余样区衰减程度相近;

(2)黄土丘陵第 I 副区和第 II 副区地形最为破碎,地形空间频率组成最为复杂,高频层所占比重较大;第 III 副区地形最为完整,主要为中低频层;第 IV 副区介于第 II 和第 III 副区之间;第 V 副区为较高频和较低频的组合,中等频率层次所占比重较小;

(3)随着分辨率的降低,高频层的地形特征损失最多,低频层基本不变。第 I 副区 DEM 分辨率从 2.5 m 降低至 25 m,地形空间频率特征随分辨率的变化高频地形信息 (Y1) 损失 30% 以上,中频地形信息 (Y2、Y3) 损失约 10%,低频地形信息 (Y4、Y5) 变化小于 1‰。不同地貌类型区地形空间频率组成的不同特征是其坡度尺度效应程度差异的关键。

3.2 讨论

较高分辨率平均坡度相近的地区坡度随分辨率降低的衰减程度并不相同。由本研究第 I 副区和第 II 副区的分析来看,第 I 副区和第 II 副区 5 m 分辨率平均坡度是接近的 (分别为 24.3 度、24.7 度),在五个丘陵沟壑区中较陡,然而随分辨率的下降,第 I 副区坡度衰减远大于第 II 副区,当分辨率低于 70 m 时,第 I 副区平均坡度低于第 IV 副区,在五个

丘陵沟壑区中仅高于第Ⅴ副区;而第Ⅱ副区的平均坡度随分辨率的变化一直是五个副区中较高的。因此,地形因子尺度效应的程度与高分辨率平均坡度并无直接关联,而是与研究区内高频信息的含量直接相关。本研究提供了高频信息含量的定量表达方法,如何在今后的坡度尺度转换中应用本研究相关成果以提高坡度尺度转换精度是值得进一步研究的问题。

参考文献(References)

- [1] LOPEZ-VICENTE M, ALVAREZ S. Influence of DEM resolution on modelling hydrological connectivity in a complex agricultural catchment with woody crops [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, **43**(7): 1403–1415
- [2] YANG D W, HERATH S, MUSIAKE K. Spatial resolution sensitivity of catchment geomorphologic properties and the effect on hydrological simulation [J]. *Hydrological Processes*, 2001, **15**(11): 2085–2099
- [3] ZHANG W, MONTGOMERY D R. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations [J]. *Water Resources Research*, 1994, **30**(34): 1019–1028
- [4] 王春梅. 坡度尺度效应与转换及其对土壤侵蚀评价影响研究 [D]. 北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2012:86–91 [WANG Chuimei. Slope scaling effect, transformation and the influence to soil erosion assessment [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Research Center of soil and water conservation and ecological environment, Ministry of Education), 2012:86–91]
- [5] SCHLÖGEL R, MARCHESINI I, ALVIOLI M, et al. Optimizing landslide susceptibility zonation: Effects of DEM spatial resolution and slope unit delineation on logistic regression models [J]. *Geomorphology*, 2018, **301**: 10–20
- [6] MCCOOL D K, FOSTER G R, MUTCHLER C K, et al. Slope length and steepness factors (LS) [M]// RENARD K G, FOSTER G R, WEESIES G A. A Guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), USDA Agriculture Handbook No 703, City: U. S. Department of Agriculture, 1997: 101–104
- [7] 张方利,周启鸣. 地形分析在流域水文建模中的应用进展 [J]. *地理与地理信息科学*, 2017, **33**(04): 8–15 [ZHANG Fangli, ZHOU Qiming. Application progress of terrain analysis in watershed hydrologic modeling [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2017, **33**(04): 8–15]
- [8] 龙永清,张旭,董梦洁,等. 基于不同方向参考系 DEM 提取坡度的差异性分析 [J]. *山地学报*, 2018, **36**(03): 462–469 [LONG Yongqing, ZHANG Xu, DONG Mengjie, et al. Analysis of the diversity of slope gradients derived from dem based on spatial reference systems with varied orientations [J]. *Mountain Research*, 2018, **36**(03): 462–469]
- [9] ARMSTRONG R N, MARTZ L W. Topographic parameterization in continental hydrology: a study in scale [J]. *Hydrological Processes*, 2003, **17**(18): 3763–3781
- [10] BORRELLI P, ROBINSON D A, FLEISCHER L R, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion [J]. *Nature Communications*, 2017, **8**(1): 13
- [11] GROHMANN C H. Effects of spatial resolution on slope and aspect derivation for regional-scale analysis [J]. *Computers & Geosciences*, 2015, **77**: 111–117
- [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**(56): 824–830 [TANG Guoan, ZHAO Mudan, LI Tianwen, et al. Modeling slope uncertainty derived from dems in loess plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, **58**(6): 824–830]
- [13] 陈楠,汤国安,朱红春. 不同空间分辨率 DEM 提取坡度不确定性研究 [J]. *水土保持研究*, 2006, **13**(03): 153–156 [CHEN Nan, TANG Guoan, ZHU Hongchun, et al. The study on the uncertainty of slope information derived from dem with different spatial resolutions [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, **13**(03): 153–156]
- [14] 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 [LIU Hongyan, YANG Qinke, WANG Chunmei, et al. Changes of dem-derived slope with horizontal resolution and their spatial distribution [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, **37**(1): 105–109]
- [15] WANG C M, YANG Q K, GUO W L, et al. Influence of resolution on slope in areas with different topographic characteristics [J]. *Computers & Geosciences*, 2012, **41**: 156–168
- [16] 何珊,王春梅,杨勤科. 1:50000 DLG 建立 DEM 适宜栅格尺寸的确定 [J]. *山地学报*, 2017, **35**(04): 572–579 [HE Shan, WANG Chunmei, YANG Qinke. Optimizing cellsize for DEM generation with 1:50 000 DLG [J]. *Mountain Research*, 2017, **35**(04): 572–579]
- [17] WOLOCK D M, MCCABE G J. Differences in topographic characteristics computed from 100 – and 1000 – m resolution digital elevation model data [J]. *Hydrological Processes*, 2015, **14**(6): 987–1002
- [18] 曹佳云. 坡度尺度效应中离散作用和平滑作用的区分 [D]. 西安:西北大学, 2012:19–40 [CAO Jiayun. Distinction between discrete action and smoothing effect in slope scale effect [D]. Xi'an: Northwest University, 2012:19–40]
- [19] WANG C M, YANG Q K, JUPP D L B, et al. Modeling change of topographic spatial structures with DEM resolution using Semi-Variogram Analysis and Filter Bank [J]. *Isprs International Journal of Geo-Information*, 2016, **5**(7): 107
- [20] 黄秉维. 编制黄河中游流域土壤侵蚀分区图的经验教训 [J]. *科学通报*, 1955 (12): 15–21, 14 [HUANG Bingwei. The experiences from compiling soil erosion zoning map in the middle yellow river region [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1955 (12): 15–21 + 14]
- [21] HUTCHINSON M F. ANUDEM Version 5.1 User Guide [M].

- Canberra; Centre for Resource and Environmental Studies, The Australian National University, 2004:53 – 102
- [22] 刘红艳, 杨勤科, 牛亮, 等. 坡度与水平分辨率关系的初步研究 [J]. 水土保持研究, 2010, 17(04): 34 – 37 [LIU Hongyan, YANG Qinke, NIU Liang, et al. Relationships between dem-derived slope and horizontal resolution [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(04): 34 – 37]
- [23] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 38 – 43 [WANG Zhengquan. Geostatistics and its application in ecology [M]. Beijing: Science Press, 1999: 38 – 43]
- [24] GOOVAERTS P. Geostatistics for natural resources evaluation [M]. Geostatistics for Natural Resources Evaluation. 1997: 437 – 438
- [25] OKSANEN J, SARJAKOSKI T. Error propagation of DEM-based surface derivatives [J]. Computers & Geosciences, 2005, 31(38): 1015 – 1027
- [26] OKSANEN J, SARJAKOSKI T. Uncovering the statistical and spatial characteristics of fine toposcale DEM error [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2006, 20(24): 345 – 356
- [27] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 45 – 46 [ZHAO Yingshi. Remote sensing application analysis principles and methods [M]. Beijing: Science Press, 2003: 45 – 46]
- [28] TARBOTON D G, BRAS R L, RODRIGUEZ-ITURBE I. On the extraction of channel networks from digital elevation data [J]. Hydrological Processes, 1991, 5(1): 81 – 100

On the Spatial Differentiation of Scale Effect of Slopes in Loess Hill and Gully Region, China

TU Xiang, WANG Chunmei*, PANG Guowei, YANG Qinke, WEN Boqing

(College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: Terrain factors extracted from DEM change with resolution (scale effect), to which it has received wide attention. The regular pattern of changes in the terrain factors with resolution vary with types of landforms, and the reason for the variation remains to be further discussed. In this study, it took five sub-regions in loess hill and gully region as study areas to investigate the regularity of slope variation with resolution at different loess landforms. It used elevation semi-variogram and introduced an Independent Structure Model (ISM) to fit the component with different spatial frequencies on the height surface. It conducted inspection of the spatial variation regularity of topographic spatial frequency level in hilly and gullied loess region, and further examined the relationship between the variation of slopes with resolution and the spatial frequency level of terrains. Results showed that the change law of slope with resolution was not the same as ones in areas with the similar average slope. The presence or absence of high-frequency terrain information and its proportion were important factors in determining the degree of attenuation of slope variation with resolution in a region. In the researches and applications related to slope scale effect and scale transformation in Hilly and gullied loess region, it should take into account of the spatial frequency composition of terrain, which is of great significance for enriching and perfecting the theoretical system of digital terrain analysis.

Key words: DEM; slope scale effect; geostatistics; topographic spatial frequency; independent structures model