

流域地貌形态多尺度三维分形量化及尺度效应

——以砭砂岩区二老虎沟为例

张传才^{1,2,3}, 秦 奋^{1,3}, 汪永新¹, 刘真真¹, 陈云生¹, 刘志丹¹

(1. 河南大学 环境与规划学院, 河南 开封 475004; 2. 安徽理工大学 测绘学院, 安徽 淮南 232001; 3. 河南大学 黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 河南 开封 475004)

摘 要:流域地貌形态的科学量化是地貌学研究和区域尺度土壤侵蚀模型研究中的热点问题之一。针对目前地貌形态分形量化模型中存在的地形模拟方法和模型结构不合理问题,基于 GIS 技术和分形理论改进了地貌形态分形量化模型,并使用无人机高分辨率 DEM 数据对砭砂岩区二老虎沟流域进行了多尺度地貌形态量化,进而研究了该区地貌形态三维分形量化的尺度效应。研究发现:(1) 随着尺度的降低,该区三维分形维数呈线性降低趋势,即地形复杂度呈线性降低趋势;(2) 砭砂岩区二老虎沟流域在 10 m 尺度地形复杂度已大大降低;(3) 根据多指标量化结果分析,地貌形态量化指标分为两类:地形复杂度指标和地形起伏度指标,前者具有明显的尺度效应,后者尺度效应不明显。

关键词:地形量化; 砭砂岩; 地貌三维分形; 尺度效应

中图分类号:P931.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)01-0278-06

Multi-Scale Quantification of Topographic Feature Using Three-Dimensional Fractal Model and Its Scale Effect in Watershed

—A Case of the Two-Tiger Valley of Pisha Sandstone Area

ZHANG Chuancai^{1,2,3}, QIN Fen^{1,3}, WANG Yongxin¹,
LIU Zhenzhen¹, CHEN Yunsheng¹, LIU Zhidan¹

(1. College of Environment and Planning, He'nan University, Kaifeng, He'nan 475004, China; 2. College of Surveying and Mapping, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 3. Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions, Ministry of Education, He'nan University, Kaifeng, He'nan 475004, China)

Abstract: Scientific quantification of topographic feature is one of the key issues in geomorphology and development of erosion model. In view of the existing problems on terrain simulation, geomorphology quantification model structure, geomorphology three-dimensional fractal model is optimized based on GIS and fractal theory, and topographic feature for Two-tiger valley in Pisha sandstone area is quantified based on multi-scale UAV DEM data and the fractal model, and scale effect of three-dimensional dimension on the area is discussed. The research found that: (1) as the topographic scale is reduced, three-dimensional fractal dimension decreases linearly, which means that terrain complexity decreases linearly; (2) terrain complexity under 10 m scale of Two-tiger valley is far less in Pisha sandstone area; (3) according to analysis on terrain quantification results based on multi index, terrain quantification indices can be divided into two types: terrain complexity index and terrain undulation index. The terrain complexity index has scale effect, and the terrain undulation index has no scale effect.

Keywords: quantifying topographical character; Pisha sandstone; topographical three-dimension fractal; scale effect of landform

尺度常常被定义为在研究对象或现象时采用的空间或时间单位,或者现象或过程在空间和时间上所涉及到的范围和发生的频率^[1]。李霖^[2]将尺度分为空间尺度、时间尺度和语义尺度,其中空间尺度又包括:地图比例尺、地理尺度、有效尺度和分辨率两类。DEM 是表达地貌形态(地形)的最主要模型之一,DEM 分辨率即为空间尺度之一,DEM 分辨率尺度已经取得了一定的研究成果^[3-7]。虽然基于 DEM 的地貌形态分形量化已经取得了较多的研究成果^[8-23],但是 DEM 分辨率对地貌形态三维分形量化的影响目前研究相对较少^[12],有待进一步研究,且已有的三维分形量化模型在模型结构及地形模拟方法上仍然存在有待改进的地方。另外,其他各种地形量化指标是否具有尺度效应也有待进一步研究。若某个地形量化指标具有尺度效应,使用该指标构建土壤侵蚀模型时,则应考虑地形尺度效应的影响。

综合以上分析,目前有两个问题亟待解决,一是地貌形态三维分形量化模型的改进,二是 DEM 分辨率对地貌形态三维分形量化指标及其他地形量化指标的影响。针对这两个问题,首先改进地貌形态三维分形模型,然后基于 GIS 组件开发技术、分形理论和改进的三维分形模型开发三维分形软件,进而对研究区不同尺

度下的地貌形态特征进行三维分形量化,以期发现地形量化随 DEM 分辨率变化的规律。砒砂岩区二老虎沟流域是重力侵蚀和水力侵蚀都异常严重的交互侵蚀区域,对该区进行地貌形态量化的尺度效应研究可为该区土壤侵蚀模型的构建提供重要参考。

1 研究区概况

砒砂岩区二老虎沟流域位于内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗沙圪堵镇,地理位置为 $110^{\circ}35' - 110^{\circ}38'E$, $39^{\circ}46' - 39^{\circ}48'N$,面积 6.3 km^2 ,图 1 为该区无人机航拍影像。砒砂岩是古生代二叠纪、中生代三叠纪、侏罗纪和白垩纪的厚层砂岩和泥质砂岩组成的岩石互层,集中分布在内蒙古自治区鄂尔多斯市的东胜区、准格尔旗、伊金霍洛旗、达拉特旗、杭锦旗。按照地表覆盖物的不同,砒砂岩区可分为裸露砒砂岩区、覆沙砒砂岩区和覆土砒砂岩区。二老虎沟流域属于覆土砒砂岩区,砒砂岩在沟谷出露,形成“黄土盖帽,砒砂穿裙”的特殊地貌景观。该区土壤侵蚀以水蚀为主,水蚀、风蚀和重力侵蚀交替发生,属于土壤侵蚀异常严重地区。该区沟谷切割很深,呈 V 字型沟道,处在沟道侵蚀生长期。图 2 是研究区无人机航拍影像的局部,可以看出该区沟壑十分发育。

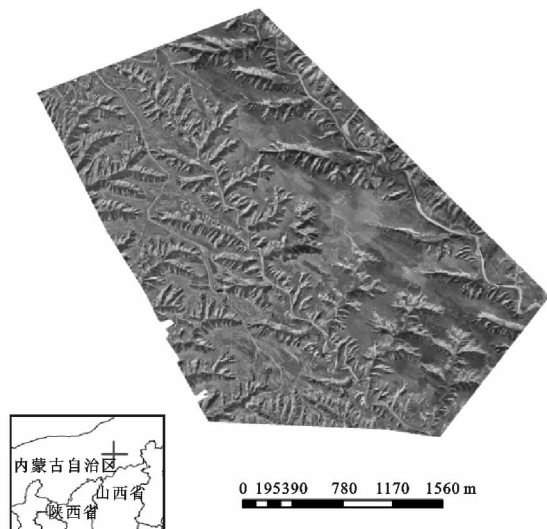


图 1 研究区位置及无人机航拍影像

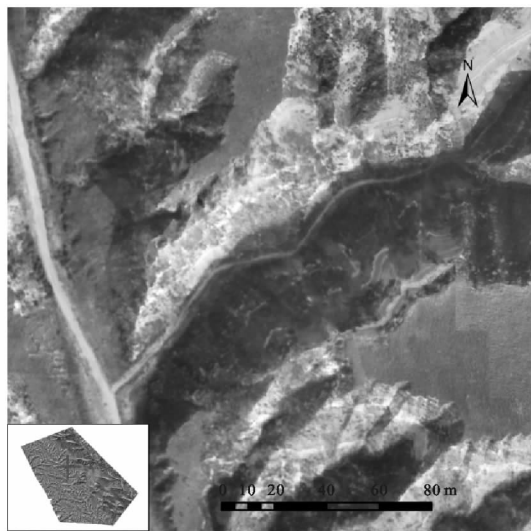


图 2 研究区航拍影像局部

2 数据与方法

2.1 多尺度 DEM 数据采集与数据处理

使用的 DEM 数据由无人机航拍结合摄影测量后期处理软件获得,采集的原始 DEM 数据为 1 m 分辨率。为研究不同尺度下的三维分形维数变化情况,对原始 DEM 数据进行重采样,分别生成 $2 \sim 32 \text{ m}$,间隔为 1 m 的 32 种分辨率的 DEM 数据。

构建的三维分形模型需要获取任意分形尺子下

扫描盒子内的高程标准差和平均坡度数据。直接由扫描盒子内的高程数据提取坡度数据时,在扫描盒子边缘会产生误差。该误差源于 DEM 生成坡度数据时采用 3×3 窗口计算,且对边缘外围数据按无数据区处理。因此,需要采用另外一种数据处理方法:对各分辨率 DEM 先生成整个区域的坡度数据,并进一步将 DEM 和坡度数据进行波段合并以便于三维分形计算。在三维分形扫描时,直接提取分形盒子内的高程数据和相应坡度数据进行统计计算,避免了产生

坡度误差,同时也降低了算法复杂度。限于篇幅,只给出 1 m 和 32 m 尺度的 DEM 与相应坡度的合成影像(图 3—4)。

2.2 研究方法

2.2.1 分形理论

(1) 分形。1967 年 Mandelbrot^[24] 在美国《Science》上发表了一篇名为“英国的海岸线有多长?”的论文,给出了分形的最初概念。后来,英国数学家肯

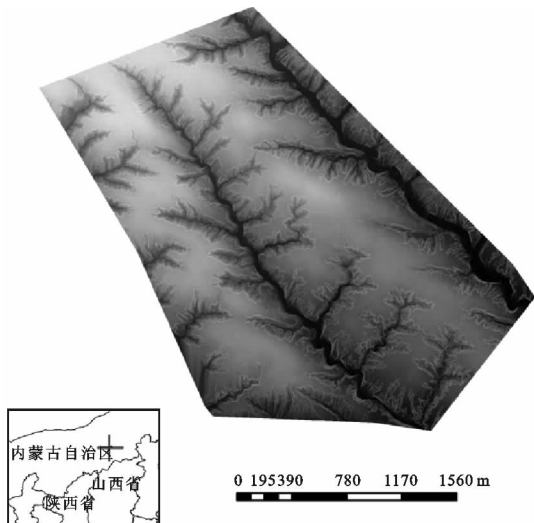


图 3 1 m 分辨率的 DEM 与坡度合成影像

(2) 分维。分维(fractal dimension)又叫分形维数,是分形理论中对非光滑、非规则、破碎的极其复杂的分形客体进行定量刻化的重要参数^[22]。常见的分形维数有:豪斯道夫维数、容量维数、信息维数和关联维数等。其中容量维和信息维在地貌分形中应用较多。容量维是指用边长为 r 的规则盒子去覆盖测量,最后根据测量的盒子数来计算维数,即为容量维,公式为:

$$D_c = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N(r)}{\ln(1/r)} \quad (1)$$

式中: $N(r)$ ——尺度为 r 下的盒子个数。

容量维只考虑了覆盖盒子个数,而没有考虑盒子内分形体的覆盖程度。通过统计分形体属于第 i 个盒子的概率改进容量维数测定方法,即可获得信息维数,公式为:

$$D_i = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^N p_i \ln p_i}{\ln r} \quad (2)$$

式中: p_i ——分形体属于第 i 个盒子的概率,其计算公式为:

$$P_i = \frac{\text{mir}_i(r)}{\text{MIR}(r)} \quad (3)$$

式中: $\text{mir}_i(r)$ ——尺度为 r 下的第 i 个盒子内的地形起伏量; $\text{MIR}(r)$ ——三维实体在尺度为 r 特征尺度下的地面起伏总量,其计算公式为:

尼思·法尔科内^[25]进行了补充,给出了较为合理的定义,他认为集 F 为分形,即认定分形具有下述性质:① F 具有精细的结构,即有任意小比例的细节;② F 是如此的不规则以至它的整体和局部都不能用传统的几何语言来描述;③ F 通常有某种自相似,可能是近似的或统计的;④ 一般 F 的“分形维数”大于它的拓扑维数;⑤ 在多数情形下 F 以简单的方法定义,可由迭代产生。

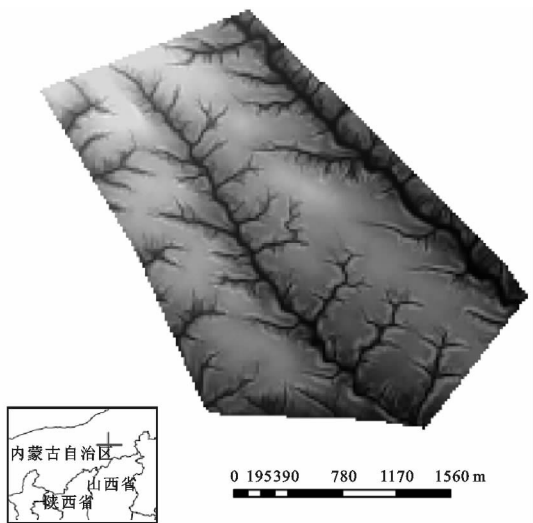


图 4 32 m 分辨率的 DEM 与坡度合成影像

$$\text{MIR}(r) = \sum_{i=1}^{N(r)} \text{mir}_i(r) \quad (4)$$

2.2.2 地貌形态三维分形模型改进

(1) 地貌形态三维分形模型存在的问题。目前,地貌三维分形模型存在问题主要包括两个方面:一是模型中使用的地形模拟方法;二是三维分形模型结构问题。地形模拟方法主要有 DEM、TIN、堆积立方体、三棱柱和四棱柱等三维模型。地形模拟使用立方体堆积表达地貌体,地形高程模拟不准确^[14],因为地貌某点的高程很少正好是立方体边长的整数倍。已有的三维分形模型结构也存在不合理性,如地形起伏量计算时使用了坡度标准差指标^[22]。坡度标准差对于平斜坡地形不太合适,会导致计算的起伏量接近零,明显不合理。

(2) 解决方案。① 四棱柱模拟地貌体。为了便于三维分形扫描计算,有两种地貌体模拟方法,一种是采用堆积小立方体来模拟地貌体^[14],另外一种是使用四棱柱来模拟地貌体^[22]。堆积立方体模拟方法对高程的模拟不准确,前节已说明原因。四棱柱模型可以准确地模拟地貌体高程,是较合理的模拟方法,适合选用。四棱柱模型就是以 DEM 像元为四棱柱底面,以 DEM 像元高程为四棱柱高度,由这些四棱柱排列组合来模拟地貌体;② 地形起伏量新指标——优化三维分形模型结构。目前常用三维分形信息维数对地貌进行

量化。信息维数考虑了分形盒子内地形信息含量的不均性,能更准确地表达地貌复杂度信息。在三维分形信息维数测算中,涉及到分形盒子内地形起伏量计算。已有学者提出了测算公式,但有待改进。基于此,需要研究设计新的地形起伏量指标。

为了既能方便计算又能全面涵盖地形起伏信息,从地形量化单因子指标中选取若干个指标重组形成新的地形起伏量指标。单因子指标选择标准是既能准确量化、方便计算又能表达地形主要特征。在地形的常见单因子指标中,地形起伏度指标对地形的概括太强,不宜选用;沟壑密度指标不易准确确定,也不宜选用;坡度标准差对于平斜坡地形明显不适用,也不宜选用;而高程标准差和平均坡度对地形起伏描述较好,适合选用。

地球表面的地貌形态最核心特征概括起来无非是高低陡缓凹凸 6 种特征。因此基本可以概化为 5 种基

本地形,以便进行深入探讨研究。为研究高程标准差和平均坡度指标表达地形起伏信息的侧重点,使用 ArcGIS 软件构建 5 种地形坡面,获取其 DEM 数据和坡度数据,并使用 ArcGIS 软件的区域统计功能对 5 种地形的高程信息和坡度信息进行统计。如表 1 所示,C 地形的起伏量明显大于 B 地形,而 B,C 两种地形平均坡度基本相同,但 C 地形的高程标准差几乎是 B 地形的两倍,因此,把高程标准差作为地形起伏量的主控因子。A,B 两种地形起伏量也应该是不同的,虽然具有相同的起伏高度,但 A 的起伏频率更大。A,B 两种地形高程标准差相同,但平均坡度,地形 A 大于地形 B。因此,平均坡度可以作为控制地形起伏频率的因子,称为地形起伏量的次级控制因子。高程标准差和平均坡度的乘积可以很好地区别 A,B,C,D 或 A,B,C,E 四种地形。因此,高程标准差和平均坡度的乘积可作为地形起伏的新指标。

表 1 5 种地形的高程信息和坡度信息统计结果

地形	面积/ km ²	高程最 小值/m	高程最 大值/m	高程平 均值/m	高程 标准差	坡度最 小值/(°)	坡度最 大值/(°)	坡度平 均值/(°)	高程标准差与 平均坡度乘积
A	1.6103	0.00	199.20	99.60	57.97	7.13	63.44	60.50	3507.04
B	1.6103	0.00	199.20	99.60	57.97	7.12	45.00	43.66	2530.69
C	1.6103	0.00	398.39	199.20	115.93	14.04	45.00	44.29	5134.50
D	1.6103	0.00	389.86	87.55	92.21	1.78	81.00	32.61	3007.37
E	1.6103	0.00	399.87	310.84	94.18	1.13	81.00	32.99	3070.81

地形起伏量 $mir(r_3)$ 的计算是模型的关键,基于以上分析,使用新设计的地形量化指标作为地形起伏量的表达式,其计算公式为:

$$mir(r_3)=std\times\alpha \tag{5}$$

式中:std——高程标准差;α——平均坡度。

2.2.3 基于 GIS 组件技术的分形软件设计与实现

(1) GIS 组件技术。GIS 组件技术是近年来地理信息系统发展的趋势之一。ESRI ArcEngine 是目前主流的 GIS 组件技术,其本身是一个 COM GIS 类库。该类库中提供了大量 GIS 组件对象,为 GIS 应用程序的开发提供了便捷方法。开发者只需根据应用的需要调用类库中的对象即可实现相应的 GIS 功能,可以把精力集中在应用模型的研发上。

(2) 基于 ArcEngine 的地貌形态三维分形扫描算法与实现。用边长为 DEM 像元宽度整数倍的正方体盒子(称为扫描盒子)对三维地貌体进行三维扫描。扫描盒子被全部填充的称为实体盒子,扫描盒子内包含地形表面的称为面盒子或特征盒子。

本模型只统计分形面盒子。三维扫描算法为:
① 根据分形盒子边长将研究区划分成 $N\times M$ 个区域;
② 对每个区域进行垂向扫描,统计扫描到的每个分形

盒子内的高程标准差和平均坡度,计算该盒子内的地形起伏量,对地形起伏量进行累计;③ 改变分形尺子,执行 1,2,3 步;④ 所有区域扫描完毕后,计算地形信息总量,并对分形尺子对数和地形信息总量做线性回归分析,计算获得分形维数;模型使用 ESRI ArcEngine 组件技术实现,它其实是一个 GIS 类库。类库中的栅格游标对象 RasterCursor 以像素块(PixelBlock)为单位读取,一个像素块正好可以对应一个分形盒子。通过改变像素块大小对应分形尺子变化。通过栅格游标对象的 IRasterCursor 接口的 next 方法遍历像素块,进而实现每个分形盒子扫描。

3 结果与分析

3.1 地貌形态三维分形多尺度量化

地貌形态分形量化中地形数据的尺度问题较少被考虑。众所周知,DEM 地形数据具有尺度效应,基于不同尺度地形数据的量化结果不具有可比性。因此,非常有必要对地貌形态三维分形量化的尺度效应进行研究,以发现地貌形态分形量化变化规律。使用开发的地貌形态分形量化软件对 32 种分辨率的 DEM 地形数据进行地貌形态量化。由于随着分辨率

的降低,DEM 像元数减少,三维分形扫描中计算的分形盒子数量相应变少,地形表现出的统计自相似性减弱,因此,基于 DEM 直接重采样方法,这里只给出 1~10 m 尺度下的三维分形信息维数,其他尺度的地貌形态量化需要一定的处理方法,在后面一节讨论。

为了进行各尺度下三维分形维数的对比分析,分

形尺子范围归一化为 20~80 m,尺子间隔为一个像元大小。各尺度下的像元大小不同,尺子间隔亦不同。另外,受 DEM 像元大小的影响,分形尺子区间无法精确统一为 20~80 m,取最接近区间。使用 ArcGIS 软件对其他地貌单因子量化指标也进行了 1~10 m 尺度的地貌形态量化,统计结果如表 2 所示。

表 2 不同尺度下的地貌多指标量化结果

分辨率/m	高程最小值/m	高程最大值/m	高程标准差	坡度最小值/(°)	坡度最大值/(°)	坡度平均值/(°)	坡度标准差	表面积与投影面积比	三维分形维数
1.00	1090.0	1214.0	26.681	0.00	81.167	21.535	18.116	1.215	1.909
2.00	1090.0	1214.0	26.671	0.00	72.269	21.154	16.169	1.165	1.892
3.00	1090.0	1214.0	26.681	0.00	68.335	20.632	15.331	1.149	1.886
4.00	1090.0	1214.0	26.677	0.00	64.884	20.134	14.731	1.140	1.861
5.00	1090.0	1213.0	26.670	0.00	62.391	19.658	14.222	1.133	1.841
6.00	1090.0	1213.0	26.677	0.00	60.283	19.190	13.753	1.128	1.821
7.00	1090.0	1213.0	26.683	0.00	58.131	18.756	13.306	1.123	1.816
8.00	1090.0	1213.0	26.658	0.00	56.740	18.346	12.893	1.119	1.791
9.00	1090.0	1213.0	26.677	0.00	54.738	17.957	12.494	1.115	1.730
10.00	1090.0	1213.0	26.677	0.00	52.876	17.579	12.129	1.111	1.708

3.2 地貌形态三维分形量化的尺度效应

用 DEM 表达地形地貌本身就是对地形特征的一种简化,随着分辨率的降低所表达的地貌特征越来越概括,细节特征丢失的越来越多。地貌三维分形维数表达的是地形地貌的复杂度信息,从直观上来理解,三维分形维数也应随着地形尺度的增大而减小。事实是否与直观理解一样,减小的幅度有多大,有无明显拐点,有无最佳的地貌形态量化尺度,这些问题需要具体分析研究。根据三维分形测算结果,点绘于图上。如图 5 所示,随着 DEM 尺度的降低,三维分形维数呈线性降低趋势。三维分形维数从 1.909 迅速降低到 1.708。从数值上看减小的不大,但是,事实上由于三维分形维数的区间主要是 1.0~2.0,三维分形维数值减小 0.2,对应的地形复杂度其实已经大大降低。

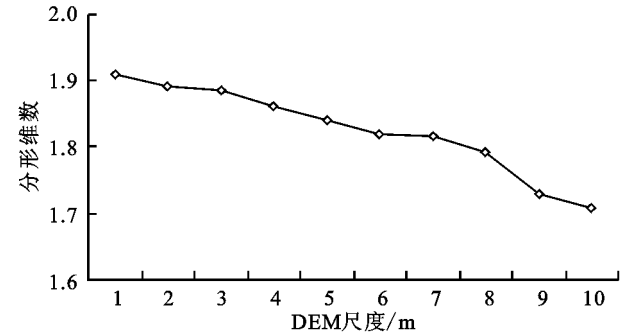


图 5 不同尺度下的三维分形维数

为了研究地貌三维分形量化在 20 m 以上尺度的变化情况,并且要尽量地统一分形区间及分形尺子间隔,需要采取特殊的处理方法。成倍减小 DEM 像

元边长且使用最邻近点重采样方法可使得各点的地貌高程在重采样过程中不发生变化。基于此,使用最邻近点重采样方法将 2~32 m 间隔为 1 m 的 31 种分辨率的 DEM 数据使用原像元边长的 1/4 大小进行重采样,使用重采样后的 DEM 构建四棱柱模型模拟地貌体,其模拟结果与原四棱柱模型相同,只是增加了四棱柱的数量。基于此方法,对各尺度下的地貌体分别进行三维分形量化。将量化结果点绘于图上。如图 6 所示,2~3 m 尺度分形量化结果很接近,4~6 m 尺度分形量化结果逐渐降低,7~11 m 尺度分形量化结果基本保持在一个水平,分形维数区间为:1.967~1.981,12~22 m,尺度分形量化结果逐渐降低,23~32 m 尺度区间分形量化结果为 1.707~1.752,出现了波动现象,但地形复杂度已经大大降低。根据汤国安等^[9]的研究成果,黄土沟壑区地形尺度阈值为 5 m,结合研究区量化结果,3 m 可作为该区最佳的地形量化尺度。

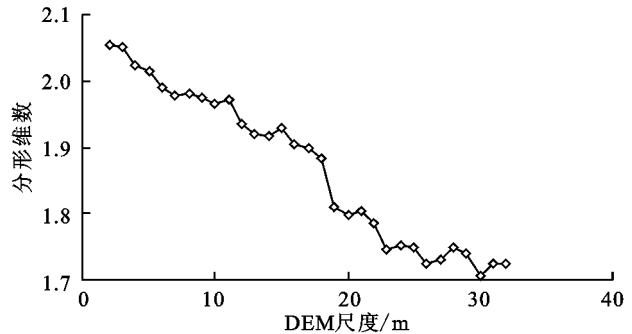


图 6 缩四棱柱底面边长为 1/4 的多尺度分形维数

对其他地形量化指标也进行了尺度效应分析,将所有指标统计结果点绘于图上。如图7所示:① 三维分形维数和平均坡度尺度效应最明显,呈线性降低趋势,且二者的斜率几乎一致,因此,在地形量化中三维分形维数可近似用平均坡度来代替;② 坡度标准差和表面积与投影面积比指标也呈降低趋势,但基本呈凹形曲线,即降低得越来越慢;③ 高程标准差与高差基本不变,因此二者尺度效应不明显。

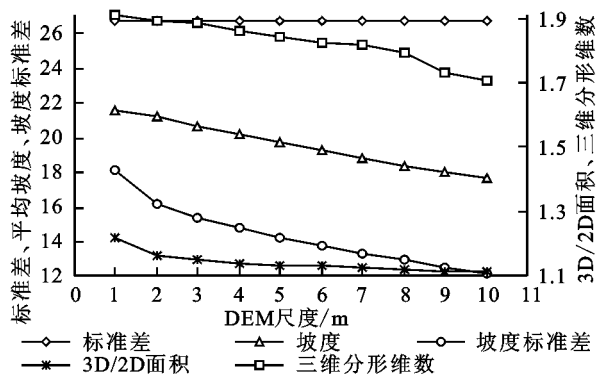


图7 多指标地貌形态量化尺度效应

综上分析,在地貌形态量化指标中,三维分形维数、平均坡度、坡度标准差及表面积与投影面积比4个指标具有尺度效应,高程标准差和高差两个指标不具有尺度效应。

4 结论

针对目前地貌形态量化模型存在的问题,从地形模拟、模型优化两个方面提出了解决思路。研究认为:① 四棱柱模型模拟地貌体是较为适合三维分形计算的方法;② 新的地形起伏量指标可优化三维分形信息维数GIS模型。基于提出的地貌形态量化解解决思路、GIS技术和分形理论,开发了地貌三维分形量化软件。使用该软件实现了砭砂岩区二老虎沟流域多尺度地貌特征量化。量化结果显示1~10 m各尺度的地貌三维分形量化区间为1.708~1.909,随着尺度的增加(DEM分辨率的降低)地貌三维分形维数呈线性降低趋势。砭砂岩区二老虎沟流域地貌三维分形量化最佳的地形尺度为3 m。在地貌形态量化指标中,三维分形维数、平均坡度、坡度标准差及表面积与投影面积比4个指标具有尺度效应,高程标准差和高差两个指标不具有尺度效应。前4个指标可称为地形复杂指标,后两个指标称为地形起伏程度指标。

针对21~32 m尺度的DEM数据,为避免分形尺子间隔和分形区间差异过大,采用了降低四棱柱底面边长的方法。基于该方法对32种尺度地貌形态进行量化,结果显示:① 1~22 m尺度范围,三维分形维数整体呈线性降低趋势;② 23~32 m尺度范围三维分形

维数出现抖动变化,原因有3个方面:采用了降低四棱柱底面边长模拟地貌体方法、分形盒子数量较少降低了地形统计自相似性以及分形区间不一致,哪个方面起主导作用,目前不易确定,有待进一步研究。

致谢:感谢国家地球系统科学数据共享平台——黄河下游科学数据中心为本论文提供数据支持。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李霖,应申. 空间尺度基础性问题研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2005,30(3):199-203.
- [3] 刘学军,卢华兴,仁政,等. 论DEM地形分析中的尺度问题[J]. 地理研究,2007,26(3):433-442.
- [4] 杨族桥. DEM多尺度表达研究[D]. 武汉:武汉大学,2009.
- [5] 宋小宁,李新辉. 坡度的尺度效应及其对径流模拟的影响研究[J]. 地理与地理信息科学,2010,26(6):60-62.
- [6] 刘红艳. 基于DEM的坡度尺度效应研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2011.
- [7] 郭伟玲. 坡度和坡长尺度效应与尺度变换研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2012.
- [8] McNab W H. A topographic index to quantify the effect of mesoscale landform on site productivity[J]. Canadian Journal of Forest Research,1993,23(6):1100-1107.
- [9] 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.
- [10] 崔灵周,肖学年,李占斌. 基于GIS的流域地貌形态分形盒维数测定方法研究[J]. 水土保持通报,2004,24(2):38-40.
- [11] 朱永清,李占斌,崔灵周,等. 基于GIS流域地貌形态特征分形与计算方法研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2005,30(12):1089-1091.
- [12] 朱永清,李占斌,鲁克新,等. 地貌形态特征分形信息维数与像元尺度关系研究[J]. 水利学报,2005,36(3):333-338.
- [13] Bolongaro-Crevenna A, Torres-Rodriguez V, Sorani V, et al. Geomorphometric analysis for characterizing landforms in Morelos State, Mexico[J]. Geomorphology,2005,67(3):407-422.
- [14] 朱永清. 黄土高原典型流域地貌形态分形特征与空间尺度转换研究[D]. 西安:西安理工大学,2006.
- [15] Papanicolaou A N T, Tsakiris A G, Strom K B. The use of fractals to quantify the morphology of cluster micro-forms[J]. Geomorphology,2012,139(2):91-108.
- [16] Pelletier J D. Fractal behavior in space and time in a simplified model of fluvial landform evolution[J]. Geomorphology,2007,91(3):291-301.

参考文献:

- [1] 宋戈, 吴次芳, 王杨. 城镇化发展与耕地保护关系研究[J]. 农业经济问题, 2006, 27(1): 64-67.
- [2] 郇红艳, 谭清美, 朱平. 城乡一体化进程中耕地利用变化的驱动力因素及区域比较[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 201-213.
- [3] 郭杰, 欧名豪, 刘琼, 等. 江苏省耕地资源动态变化及驱动力研究[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(2): 139-145.
- [4] 曲福田, 陈江龙, 陈雯. 农地非农化经济驱动机制的理论分析与实证研究[J]. 自然资源学报, 2005, 20(2): 231-241.
- [5] 周京奎, 王岳龙. 大中城市周边农地非农化进程驱动机制分析: 基于中国 130 个城市面板数据的经验[J]. 经济评论, 2010(2): 24-34.
- [6] 曲福田, 吴丽梅. 经济增长与耕地非农化的库兹涅茨曲线假说及验证[J]. 资源科学, 2004, 26(5): 61-67.
- [7] 高魏, 闵捷, 张安录. 农地城市流转与城市化、经济增长动态关系的计量经济分析: 以湖北省 1980—2003 年为例[J]. 资源科学, 2010, 32(3): 564-572.
- [8] 万胜超, 王良健, 刘敏. 基于空间的省际农地非农化驱动因素研究[J]. 经济地理, 2012, 32(7): 123-128.
- [9] Song Xiaoping, Ouyang Zhu, Li Yunsheng, et al. Cultivated land use change in China, 1999—2007: Policy development perspectives[J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(6): 1061-1078.
- [10] 李伟, 郝晋珉, 冯婷婷, 等. 基于计量经济模型的中国耕地数量变化政策与资产因素分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 115-118.
- [11] 姚远, 李效顺, 曲福田. 中国经济增长与耕地资源变化计量分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 209-215.
- [12] 陈利根, 龙开胜. 耕地资源数量与经济发展关系的计量分析[J]. 中国土地科学, 2007, 21(4): 4-10.
- [13] 汪涌, 蔡运龙, 蒙古军. 中国耕地流转驱动力研究综述[J]. 资源科学, 2007, 29(3): 177-182.
- [14] 郭雅雯, 赵敏娟. 基于 STIRPAT 模型的陕西省耕地面积变化社会经济驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(6): 197-201.
- [15] 吴美琼, 陈秀贵. 基于主成分分析法的钦州市耕地面积变化及其驱动力分析[J]. 地理科学, 2014, 34(1): 54-59.
- [16] 刘彦彤, 张延军, 赵玲. 长春市耕地动态变化及其驱动力分析[J]. 地理科学, 2011, 31(7): 868-873.
- [17] 白小梅, 李璧成, 白均堂, 等. 陕西省旬邑县耕地面积变化及驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2010, 17(5): 59-62.
- [18] 詹文娟, 裴豪杰, 黄琼, 等. 滁州市耕地变化及驱动力分析[J]. 浙江农业科学, 2015, 56(3): 409-411.
- [19] 倪超, 杨胜天, 罗秋滨, 等. 黑龙江省耕地集约利用驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3): 146-151.

~~~~~

(上接第 283 页)

- [17] 王民, 李占斌, 崔灵周, 等. 基于变分法和 GIS 的小流域模型三维地貌分形特征量化研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(4): 128-131.
- [18] Miliareisis G C. Quantification of terrain processes[M] // Zhou Q, Lees B, Tang G. Advances in digital terrain analysis. Berlin: Springer, 2008.
- [19] Martin E, John L. High resolution quantification of gully erosion in upland peatlands at the landscape scale[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2010, 35(8): 876-886.
- [20] Smith M J. Digital mapping: Visualisation, interpretation and quantification of landforms[J]. Geomorphological Mapping, 2011, 15: 225-251.
- [21] Hillier J K, Smith M J. Testing 3D landform quantification methods with synthetic drumlins in a real digital elevation model[J]. Geomorphology, 2012, 153(6): 61-73.
- [22] 陶象武. 基于 GIS 的流域地貌形态分形空间变异特征研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2012.
- [23] Siart C, Forbriger M, Nowaczinski E, et al. Fusion of multi-resolution surface (terrestrial laser scanning) and subsurface geodata (ERT, SRT) for karst landform investigation and geomorphometric quantification[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2013, 38(10): 1135-1147.
- [24] Mandelbrot B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension[J]. Science, 1967, 156(3775): 636-638.
- [25] 肯尼思·发尔科内. 分形几何: 数学基础及其应用[M]. 曾文曲, 译. 沈阳: 东北大学出版社, 1991.