

基于 DEM 的细沟形态分维估算方法探讨

张攀^{1,2}, 孙维营¹

(1. 黄河水利科学研究院 水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室, 河南 郑州 450003;
2. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了促进分形理论在细沟形态量化中的应用, 在回顾以往研究的基础上, 探讨了一种以 DEM 为数据源, 基于 ArcGIS 软件的坡面侵蚀地形数据处理、水文信息提取的方法, 通过具体实例, 运用网格覆盖法实现了细沟形态分形维数的计算, 达到了精确、高效的应用效果。

关键词: 细沟形态; 分形维数; DEM; ArcGIS

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2013)05-0116-04

Discussion on calculation method of rill morphological fractal dimension based on DEM

ZHANG Pan^{1,2}, SUN Weiyong¹

(1. Key Laboratory of Soil and Water Loss Process and Control on the Loess Plateau, Yellow River Institute of Hydraulic Research, MWR, Zhengzhou 450003, China;
2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to promote the application of fractal theory in rill morphologic quantification, on the basis of reviewing the research on development process of fractal theory of soil erosion, the paper discussed a method of topographical data processing of slope erosion and hydrologic information extraction based on database DEM and ArcGIS software. Through the specific example, the method realized the calculation rill morphological fractal dimension by use of grid covering method. It got precise and efficient application effect.

Key words: rill morphology; number of fractal dimension; DEM; ArcGIS

美国科学家 B. B. Mandelbrot 于 20 世纪 70 年代中期创立的分形理论为刻画自然界中一些不规则、不稳定和具有高度复杂结构的现象提供了一项有效工具。不仅为地理现象特征及其内在成因机制的认识建立了崭新的数学语言和定量描述, 同时亦为土壤侵蚀的研究提供了新思想和新方法。自 20 世纪 90 年代以来, 美国、西欧和日本迅速开展了地理学中的分形研究。随后, 我国以黄土高原流域地貌为研究对象的分形研究相继展开。以姚文艺等^[1] (2005) 崔灵周等^[2] (2006) 等为代表的一批学者基于分形量化的方法, 对黄土高原典型土壤侵蚀类型区流域地貌分形特征与侵蚀产沙等问题进行了深入研究。在分形理论的应用中, 以水系分形最为成熟, 而坡面细沟沟网是水系发育的初始阶段, 也是水系形态结构的缩影, 国外一些试验也证明了水系网和细沟沟网的相似性^[3-6], 为细沟沟网的分形量化奠定了理论基础。在此基础上, Fujiwara T、Fukada M^[7-8]、王协康^[9]、

张莉^[10] 等人的研究成果相继证明分形维数反映的是细沟沟网发育的复杂程度或者不规则程度, 在一定程度上能反映整个坡面侵蚀过程中侵蚀强弱的动态变化, 是可用于整体性地描述坡面细沟发育形态的综合性量化指标。随后, 薛海等^[11]、张凤宝等^[12] 围绕坡面细沟分形开展了一些试验研究得到了细沟分形维数与侵蚀量间的相关关系, 对土壤侵蚀随坡面细沟形态的发育变化取得了一些初步认识。

分形维数的计算有赖于测量技术和计算机软件的发展, 本文提出了一种以 DEM 为数据源, 利用地理信息系统软件平台 ArcGIS10, 自动提取河网及子流域属性, 结合分维估算方法求取河网分形维数的方法。

1 分维估算方法

分形维数的测量计算方法有多种, 对于一定小区的统计测量而言, 盒维数法 (box counting techniques) 简单而又客观实用, 故目前得到普遍推广应用。

收稿日期: 2013-05-17; 修回日期: 2013-09-01

基金项目: 水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室开放课题基金项目 (201206)

作者简介: 张攀 (1982-), 女, 河南洛阳人, 在读博士研究生, 工程师, 主要从事土壤侵蚀及河流泥沙研究。

盒维数法是一方便而客观的分维测量方法,若在所选定的区域内,将研究区分成若干边长为 r 的格子,非空格子数 $N(r)$ 与格子的尺寸 r 具有一一对应关系。若有 M 个不同的 $r_i (i = 1, 2, 3, \dots, M)$, 则有 M 个不同的 $N(r)$ 值, 即有: $N(r) \sim r^{-D}$ 。确定存在几何体的格子数目 N , 然后改变 r 求相应的 $N(r)$, 依次类推, 利用最小二乘法对 $\ln N(r)$ 和 $\ln(r)$ 作一元线性回归便可得到分形维数 D_f 的估计值。

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

2 基于 DEM 的沟网信息提取过程

数字高程模型 (DEM) 是表示区域 D 上的三维向量有限序列, 是地理信息系统数据库中最为重要的空间信息资料, 也是赖以进行三维空间数据处理与地形分析的核心数据。DEM 中蕴涵着丰富的地形、地貌信息, 能有效地反映区域的基本地形空间分布规律与地貌特征。借助这些地貌特征并通过一定的算法就可以提取出水系及其相关的水文、地形因子。从 DEM 提取水系通常以栅格型 DEM 为基本数据。

由栅格型 DEM 数据提取沟谷、水系主要有两种方法。一种方法是对 DEM 数据进行窗口分析, 移动窗口来确定上凹面 (Puekcer 等^[13]) 或 v 型面 (Jenson^[14])。在这些面底部的格网单元被视为水道或沟谷的组成部分。这一方法的严重缺点在于生成的水系不连续, 需要重新连接 (O' Callaghan 等^[15]) 和修正 (Douglas^[16])。对地形起伏较小或地形复杂的地区这一缺陷更加突出, 限制了该方法的应用。

另一种提取河网的方法是 O' Callaghan 等提出的坡面流模拟方法, 后来 Jenson 等^[17] 等研究者应用了该方法。这一方法根据水文学坡面流概念来判别水流路径。先根据每一栅格单元与相邻单元之间的最陡坡度求取沿水流路径集水面积的累积, 再选择适当的水道集水面积阈值来确定河网。该方法简单易行, 可以直接生成连续的河网。缺陷是对于较复杂的凹陷与平坦处水流方向的确定无能为力。1992 年, Martz 和 Garbrecht 采用了填平的方法来解决凹陷的问题, 即将洼地内所有栅格单元垫高至洼地周围最低栅格单元的高程, 使生成的河网可以连续。

目前, 第二种方法是提取沟谷、水系常用的方法。因此, 基于 DEM 提取水系要经过三个主要过程, 即无洼地 DEM 的生成、水流方向矩阵的生成和 水流累积矩阵的生成。ArcGIS 将水系特征提取的相关命令集成在 Hydrology 菜单中, 使用时可直接调用相应的函数。

2.1 无洼地 DEM 的生成

洼地指的是低于周围栅格的区域, 分为伪洼地和自然洼地。伪洼地在栅格 DEM 中普遍存在, 主要来自输入数据的错误、不合适的插值方法和栅格大小等方面。伪洼地的存在会阻碍自然水流朝流域出口流动, 因此, 在 DEM 提取水系特征之前要进行填洼预处理。

现有的提取水系特征的方法的基本思想是将洼地内的所有栅格单元垫高至洼地周围最低邻接栅格单元的高程, 从而消除洼地。对于复杂的地形, 在处理洼地时应考虑洼地与平地, 洼地与洼地之间的相互嵌套的复杂情形, 对于平地也不能一概而论, 应视其位置、形态和类型的不同, 有区别的加以处理, 强调处理的合理性, 以使处理在效率和效果上满足实用要求^[13]。

其操作时主要是利用 Hydrology 工具集中 flow direction 工具提取水流方向, 利用 sink 工具计算洼地, 利用 watershed 工具计算洼地的贡献区域, 然后利用 Zonal 工具计算每个洼地所形成的贡献区域的高程、在 raster calculator 中计算洼地深度 sinkdep, 利用 Hydrology 工具集中 fill 工具进行填充。

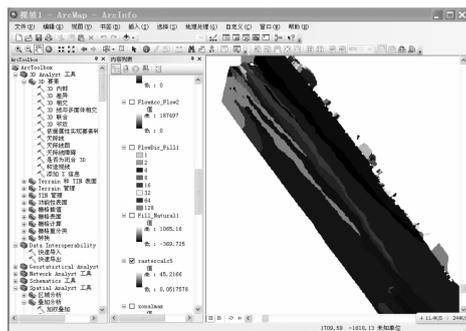


图 1 计算出的洼地深度图

2.2 汇流累积量的计算

汇流累积量数值矩阵表示区域地形每一点的流水累积量。汇流累积量计算的主要目的是确定河流网络, 进而在河流网络的基础上确定流域边界即分水线, 一般用汇流累积量 (或称为集水面积) 作为河道认定的门槛标准。

汇流累积量的计算包括两方面: ①利用 Hydrology 工具集的 flow direction 工具计算无洼地 DEM 的水流方向, 可以得到 8 方向的水流流向。ArcGIS 中的流向分析是比较任一点与其周围 8 个点间的高程大小与落差, 将高程下降最大的方向定位该点的流向; ②利用 Hydrology 工具集中 flowaccumulation 工具, 计算汇流累积量。

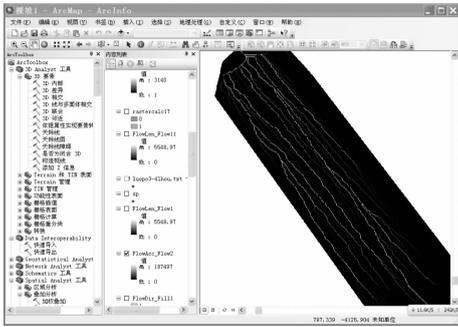


图2 通过计算生成的汇流累积量数据

格转换成矢量就能得到流域划分图(图4)。

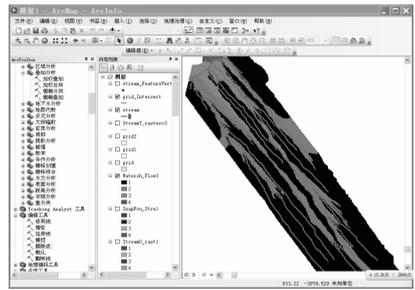


图4 计算出的流域盆地(线状图形为矢量河网数据)

2.3 河网的提取及流域的划分

河网的提取是以提取的汇流累积量为标准的。将各河道按有效的水流方向连接产生流域河网,划分流域水系。流域又称集水区域,是指流经其中的水流和其它物质从一个公共的出水口排出从而形成的一个集中的排水区域。其边界是依据 DEM 的数字地形分析来确定的,按照生成的起始河道和流域水系,从最低级河道到高一级河道直至全流域。

应用水文分析 (Hydrology) 下的定义河系 (Stream Definition) 命令对流向累积栅格设置集流阈值。集流阈值 (threshold of flow accumulation) 为河系网络提取的关键因子,利用 Spatial Analysis 工具箱中 raster calculator 工具,提取汇流累积量大于某阈值的栅格河网,开始进行分析时,可以选择从小到大的几个汇流累积量阈值,观察最适合提取河网的阈值范围;其次利用 Hydrology 工具集中 stream to feature 工具矢量化栅格的河网;最后利用 Editor 工具,手动删除伪沟谷。这样就得到了由 DEM 提取的流域自然水系。通过实验选取 flow accumulation ≥ 500 作为阈值提取水系,通过修改后得到该地区的水系分布图(见图3)。

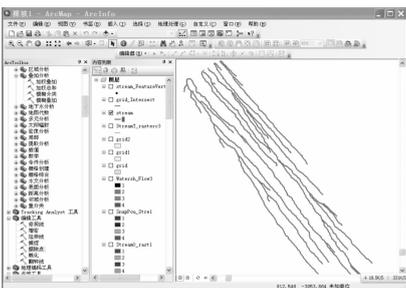


图3 栅格河网转换成的矢量河网框

流域划分是在无洼地 DEM 提取水流方向 flow-direction 数据基础上,利用 Hydrology 工具集中 basin 工具计算得到的。通过分类确定区域,对小区域进行合并或删除,利用 conversion 工具,将生成的栅

3 基于覆盖法的分维估算实例

在 ArcGIS 中利用创建渔网 (Fishnet) 命令生成大小分别为 200×200 、 150×150 、 120×120 、 100×100 、 85×85 、 75×75 、 50×50 、 40×40 、 30×30 、 20×20 、 15×15 、 10×10 、 5×5 、 3×3 、 2×2 、 1×1 的网格。然后将这些网格分别覆盖河网,得到计算结果表 1。

表 1 基于网格法的分维估算过程

次数 M	网格尺寸(r)	网格数量 $N(r)$	$\ln(r)$	$\ln N(r)$
1	200	98	5.2983	4.5850
2	150	159	5.0106	5.0689
3	120	227	4.7875	5.4250
4	100	305	4.6052	5.7203
5	85	387	4.4427	5.9584
6	75	483	4.3175	6.1800
7	50	841	3.9120	6.7346
8	40	1114	3.6889	7.0157
9	30	1545	3.4012	7.3428
10	20	2521	2.9957	7.8324
11	15	3476	2.7081	8.1536
12	10	5731	2.3026	8.6536
13	5	13924	1.6094	9.5414
14	3	17932	1.0986	9.7943
15	2	29089	0.6931	10.2781
16	1	69687	0.0000	11.1518

根据公式(1)得到坡面细沟侵蚀沟网的分形维数 $D = 1.2075$ 。由计算结果可以看出,坡面细沟沟网是比较简单的。

4 结论与讨论

本文介绍了一种基于 DEM 的细沟沟网分维估算方法,并结合计算实例进行了具体应用。在利用 DEM 提取细沟沟网时,集流阈值的选取是最为关键的一步,将直接影响结果的精度,目前主要是通过观察对比实际的细沟形态和提取结果的吻合程度选取阈值,存在一定的主观性,从而会对分形维数的估算造成一定影响。

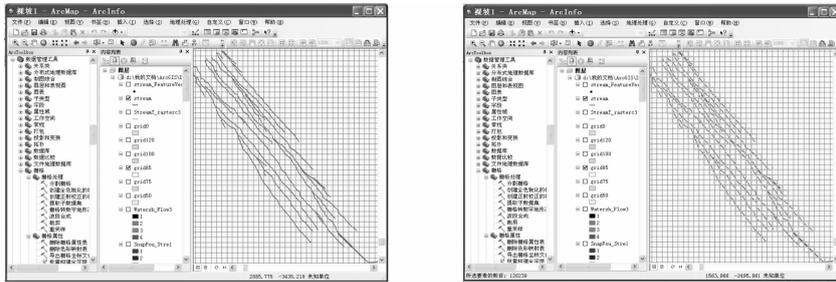


图 5 网格覆盖与非空网格统计查询

DEM 是地理信息系统数据库中最为重要的空间信息资料,它的应用遍及整个地学领域。在水利科学方面,由于地表的物理特性决定了流经其上的水流的特性,同时水流将反过来影响地表的特性,因此对水文分析来说,DEM 的作用在于确定地表的物理特征,然后在此特征之上再现水流的流动过程,最终完成水文分析的过程。但是不同分辨率 DEM 本身数据来源具有误差,其精度对于水文特征的提取精度有直接影响,因此在使用前要做好数据预处理,利用相应算法对数据进行平滑、对齐、滤波等数据处理工作,为模型的构建做好铺垫。

ArcGIS 软件中的 Hydrology 工具可以从 DEM 中完成累积量、水流长度、河网提取、流域划分等多项水文分析任务,在坡面土壤侵蚀的研究中可用于细沟侵蚀沟网的提取。在 ArcGIS 的数据管理模块下可以进行网格分析,实现分形维数的计算。ArcGIS 和 DEM 的配合使用使分形维数的计算方便、高效,对于分形理论在土壤侵蚀研究领域的应用具有一定意义,深化了地理信息系统在分形研究中的应用,对坡面细沟沟网分形性质的研究具有一定促进意义。

参考文献:

- [1] 姚文艺,李占斌,康玲玲. 黄土高原土壤侵蚀治理的生态环境效应[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [2] 崔灵周,朱永清,李占斌. 基于分形理论和 GIS 的黄土高原流域地貌形态量化及应用研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2006.
- [3] Mosley M P, Experimental study of rill erosion[J]. Transactions of ASAE, 1974,17(5): 909-916.
- [4] Wilson B N, Storm D E. Fractal analysis of surface drainage networks for small upland areas[J]. Transactions of ASAE, 1993,36(5):1319-1326.
- [5] Helming K, Romakens M J M, Prasad S N, et al. Erosional development of small scale drainage networks, in Process Modelling and Landform Evolution[M]. New York: Springer-Verlag,1998.
- [6] Gomez J A, Darboux F, Nearing M A. Development and e-

- volution of rill networks under simulated rainfall[J]. Water Resources Research, 2003, 39 (6): 1-14.
- [7] Fujiwara T, Fukada M. Study on the fractal dimension of rill patterns that develop on Hillslope [J]. International Workshop on Conservation Farming on Hillslopes, 1989,1 (2):1-13.
- [8] Fujiwara T, Fukada M, Motoyoshi F. An experimental study of the rill formation process on a bare slope. Technology reports of the Yamaguchi University[J]. 1990, 4 (4): 313-323.
- [9] 王协康,方铎. 坡地侵蚀平面形态的研究[J]. 四川水力发电, 1998, 17 (2): 85-86.
- [10] 张莉,张青峰,郑子成,等. 基于 M-DEM 的黄土人工锄耕坡面水系分维特征研究[J]. 水土保持研究,2012, 19(5):7-11.
- [11] 薛海,孔纯胜,熊秋晓,等. 坡面沟蚀及其分形特性试验研究[J]. 人民黄河, 2008, 30 (12): 90-93.
- [12] 张凤宝,杨明义. 基于 7Be 示踪和细沟沟网分形维数研究坡面土壤侵蚀[J]. 核农学报,2010,24(5):1032-1037.
- [13] Peucker, T. K., Douglas, D. H., Detection of surface specific points by local parallel of discrete terrain elevation data[J]. Computer and Image Processing, 1975, (4): 375-387.
- [14] Jenson, S. K., Application of hydrologic information automatically extracted from digital elevation models [J]. Hydrological Processes, 1991(5):31-44.
- [15] O'Callaghan F, Mark D. M.. The extraction of drainage networks from digital elevation data[J]. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1984, 28: 323-344.
- [16] Dougals, D. H., Experiments to locate ridge and channels to create a new type of digital elevation model [J]. The Canadian Surveyor, 1987, 41(3): 373-406.
- [17] Jenson, S. K., Dominique, J. O., Extracting topographic structure from digital elevation data for geographical information system analysis [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1988,54(11): 1593-1600.
- [18] 王程,韩新海. ArcGIS 环境下基于 DEM 的水文特征提取——以县南沟流域为例 [J]. 地下水, 2011,33 (4):174-176.