文章编号: 0559-9350(2005) 03-0333-06

地貌形态特征分形信息维数与像元尺度关系研究

朱永清[1,3], 李占斌[1,2], 鲁克新[1], 崔灵周[4]
(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
3. 长江流域水土保持监测中心站, 湖北 武汉 430010; 4. 温州师范学院 生命与环境科学学院, 浙江 温州 325027)

摘要: 本文论述了用分形信息维数(FID) 表征流域地貌形态特征的原理和方法; 建立了基于 GIS 平台流域地貌特征分形信息维数的计算模型; 并利用 Avenue 语言开发了基于 Arcview 环境下流域地貌特征分形信息维数计算软件。以长江弹子溪小流域为例进行地貌分形信息维数的计算, 依据计算数据就地貌形态特征分形信息维数与像元尺度关系进行了分析。结果表明: 流域地貌分形信息维数可以较好地作为流域复杂地形地貌形态特征综合性、整体性和科学性的量化指标; 像元尺度对地貌分形信息维数的无标度区间确定十分关键; 跨流域地貌形态特征分形信息维数计算与评估应以统一像元尺度为前提。

关键词: 分形; 地貌形态特征; 分形信息维数; GIS; 像元尺度
中图分类号: P931.1 文献标识码: A

地形地貌形态是土壤侵蚀的主要因素之一, 同时也是进行水文过程模拟、水土流失预测预报的重要因子。因此, 深入研究地貌形态, 正确理解、描述与量化地貌形态特征, 详尽分析地貌形态特征标量同诸相关因子的关系, 对研究水文、水土流失及流域地貌发展规律无疑具有非常重要的意义。

在地球表面复杂地貌形态的表达中, 人们经历了从图形描述到数学描述的发展过程[1], 目前比较成熟的表示方法主要有: 特征点法、特征线法、剖面线法、等高线法、不规则三角网法、规则格网法、数字高程模型(DEM) 等。人们通常基于这些模型方法提取地形地貌特征因子, 进行水土流失研究。在已有的流域水土流失评价和预报模型中, 诸多学者将流域高差比、沟壑密度、平均坡度、平均长度及沟谷切割深度等中的一个或多个作为流域水土流失预报模型中地貌因子的量化参数[2~7], 这些量化参数分别只表征流域地貌某一方面的特征, 而对流域地貌整体性和综合性的表达不甚合理, 因此, 在流域水土流失评价和预报研究领域存在明显的局限性。分形理论是由曼德尔布罗特 (Mandelbort B B) 于 1967 年创立的一门新兴学科, 旨在探索自然界中无序、非稳定、非平衡、非确定性、非线性的现象和过程, 研究自然界中有序– 无序、宏观– 微观、整体– 局部之间的内在规律[8,9]。艾南山[10]等尝试利用分形理论研究流域地貌形态特征, 形成分形地貌学。有研究认为, 运用分形理论来研究流域地貌特征, 以分形维数作为看似复杂的流域地貌量化参数, 可以表征流域地貌的综合特征, 对于流域乃至区域水土流失预报模型的建立具有重要推动作用[11]。

本文以地理信息系统(GIS) 为平台, 建立流域地貌形态特征 GIS 分形数学模型, 基于该模型进行相关 GIS 软件的开发, 同时结合弹子溪小流域地形数据进行不同像元尺度(即等高线栅格数据像元尺寸) 下地貌分形信息维数的计算, 最后就流域地貌形态特征分形维数对像元尺度的敏感性问题进行分析。

收稿日期: 2004-10-09
基金资助: 国家自然科学基金资助项目(40301026)
作者简介: 朱永清(1965–), 男, 湖北武汉人, 博士生, 从事水文水资源方向土壤侵蚀专业研究。Email: zhuyongqingwp@cjwnic.net

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 分形信息维数 GIS 模型

自然地貌形态具有结构精细性、自相似性和标度不变性等特征, 具有分形性质。因此, 按照分形理论, 自然地貌形态可以用分形维数来表述其几何特征。

1.1 地貌形态分形信息维数指标的选取 在分形理论中, 分形维数是用来描述客体形状、结构、功能复杂程度的概化指标, 其定义形式多样, 如 Hausdorff 维数 D_h、信息维数 D_i、关联维数 D_g、相似维数 D_s、容量维数 D_c、谱维数 D_f、填充维数 D_p、分配维数 D_d 等[2]。信息维数 D_i 能充分描述客体复杂信息的含量, 适合地貌丰富信息的定量表征, 因此, 本文选取信息维数作为流域地貌形态特征的分形参数指标。

1.2 分形信息维数的 **GIS** 模型 在 GIS 中, 通常用 DEM 描述地面三维信息, 它将高程信息以栅格形式储存在相应的规则格网像元(cell) 中, 因此, 可以通过非零值盒子数与盒子中的非零 cell 数(高程大于 0) 的统计值来共同表述地貌形态的综合信息。本文提出流域形态特征信息维数 GIS 数学模型

$$D_i = -\lim_{r \to 0} \frac{\ln[P \times \sum_{i=1}^{n} P(i) \times P'(i)]}{\ln r} \tag{1}$$

式中: D_i 为流域地貌形态特征信息维数; r 为盒子边长; n 为流域中一个盒子中最大可能出现的非零 cell 的数量; P 为流域单位面积内包含的盒子数, P = 包含非零 cell 的盒子总数/流域面积; $P(i)$ 为扫描中包含 i 个非零 cell 的盒子出现的概率, $P(i)$ = 包含 i 个非零 cell 的盒子数之和/包含非零 cell 的盒子总数; $P'(i)$ 为一个盒子内出现 i 个非零 cell 的概率, $P'(i)$ = 一个盒子内出现的 cell 数量 i/一个盒子的面积。

2 软件开发与计算

根据式(1) 的计算模型, 本文在 Arcview 平台下实现流域地貌形态分形信息维数的相关软件的开发, 并结合弹子溪小流域地形数据进行分形信息维数的计算。

2.1 技术路线 流域地貌形态分形信息维数实际上也是盒子维数, 因此可通过选择适当的盒子进行流域地貌模型“扫描”统计进行分析计算。其技术路线是: 在 ArcGIS 平台下, 首先制作基于规则格网的等高线栅格数字专题层(Grid 格式) , 在此数字层中有等高线通过的 cell 被赋予数值 1, 其它的 cell 则赋 0; 然后选择适当大小的盒子(正方形) , 以此盒子为视窗在等高线栅格数字图层上进行逐行逐像元“扫描”, 记录并统计每次“扫描”中非空盒子(即包含非零 cell 的盒子) 数量和每个非空盒子内获取的非零 cell 的个数; 最后根据式(1) 进行概率统计和流域信息维数计算, 并根据计算结果就地貌分形维数对像元尺度的敏感性进行分析, 见图 1。

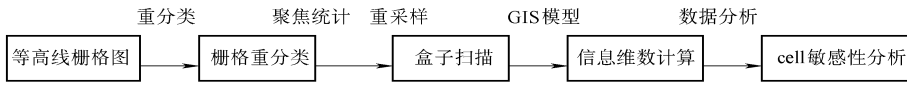


图 1 分形维数的计算框图

2.1.1 *栅格数据创建* 等高线栅格数据是进行分形维数计算和分析的基础数据, 它是一种线性栅格数据, 采用普通地形图、等高线矢量图、DEM、TIN 等原始资料通过不同的技术途径在 GIS 平台中创建。

2.1.2 *像元尺度选定* 在分形信息维数的计算中, 栅格数据像元尺度的选定非常重要, 它将对信息维数计算值产生很大影响。像元尺度选择太大将损失许多微地貌信息, 并可能使计算数据超出无标度区; 像元尺度选择太小将导致数据量呈几何级数递增, 影响计算速度甚至导致计算机死机。因此必须科学认真地设定像元尺度的大小, 本文在后面将作详细分析。

2.1.3 *盒子的选定* 由式(1) 可知, 分形信息维数的计算实质上是将扫描盒子尺寸逐步趋近于零计算极限的过程, 然而在实际计算过程中所选定的盒子数总是有限的(可选择 10 个以上的盒子数) , 因此有

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

必要对盒子尺寸进行适当的选择,一般选择等高线栅格数据图层像元尺度的整数倍。

2.2 软件开发 基于以上技术路线和GIS模型,本文在Are-workstation和Arcview平台下实现流域地貌形态分形信息维数的计算,并利用Avenue语言进行相关软件模块的开发[13,14],程序工作流程见图2。

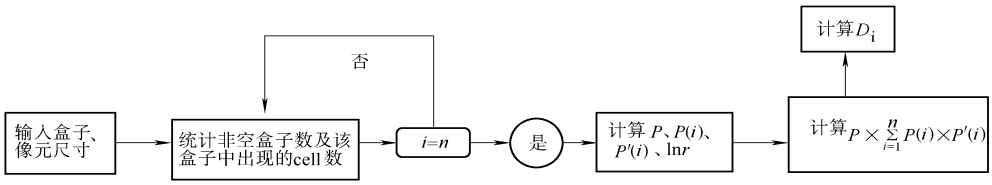


图2 程序工作流程

根据实际情况输入适当的扫描像元尺度和盒子尺度,利用本文软件进行计算后,即可显示出流域分形信息维数值及有关中间成果,同时在View视窗显示相应的栅格图层。

2.3 信息维数计算 下面以长江流域弹子溪小流域为例,利用本文开发软件对该流域的地貌形态特征分形维数进行计算。

2.3.1 流域概况 弹子溪小流域位于重庆市万州区最南端,面积41.2km^2,流域内最低高程180m,最高高程1 420m,最大地形起伏1 240m,属于高山区,流域内地形切割比较破碎,属于地貌比较复杂的地区。数据源选择1∶50 000比例尺的等高线矢量图,等高距20m。

2.3.2 像元尺度设置 为进行像元敏感性分析,实际计算中选择一系列不同的像元尺度分别进行信息维数计算,依次为5m×5m、10m×10m、15m×15m、20m×20m、25m×25m、30m×30m、35m×35m、40m×40m、45m×45m、50m×50m、75m×75m和100m×100m。

2.3.3 盒子尺度设置 同样,盒子尺度也选择一系列值,它们均为像元尺度的整数倍,分别有:2×2、3×3、4×4、5×5、6×6、7×7、8×8、9×9、10×10、11×11、12×12、13×13、14×14、15×15、16×16、17×17(单位:像元数)。

2.3.4 计算结果 由于数据源为等高线矢量数据,因此按照等高线矢量数据创建等高线栅格数据层的作业方式进行数据的创建,经过重分类、盒子扫描、统计计算,最后计算出弹子溪小流域地貌特征信息维数系列值D_i,计算结果见表1。

表1 弹子溪小流域地貌形态特征分形信息维数

像元尺度	盒子尺度															
	2×2	3×3	4×4	5×5	6×6	7×7	8×8	9×9	10×10	11×11	12×12	13×13	14×14	15×15	16×16	17×17
5×5	1.4920	1.4736	1.4562	1.4395	1.4232	1.4092	1.3977	1.3899	1.3794	1.3737	1.3670	1.3620	1.3570	1.3544	1.3499	1.3466
10×10	1.2425	1.2284	1.2158	1.2073	1.2009	1.1963	1.1935	1.1899	1.1889	1.1876	1.1882	1.1856	1.1850	1.1851	1.1850	1.1851
15×15	1.1420	1.1325	1.1248	1.1201	1.1167	1.1136	1.1134	1.1138	1.1138	1.1132	1.1150	1.1160	1.1167	1.1191	1.1216	1.1256
20×20	1.0977	1.0913	1.0866	1.0838	1.0812	1.0798	1.0790	1.0799	1.0804	1.0814	1.0849	1.0850	1.0871	1.0901	1.0981	1.0970
25×25	1.0790	1.0731	1.0707	1.0681	1.0666	1.0657	1.0650	1.0639	1.0656	1.0679	1.0709	1.0768	1.0794	1.0841	1.0959	1.1018
30×30	1.0643	1.0651	1.0640	1.0628	1.0617	1.0599	1.0606	1.0594	1.0602	1.0645	1.0681	1.0725	1.0767	1.0869	1.0879	1.1052
35×35	1.0595	1.0630	1.0621	1.0610	1.0595	1.0584	1.0581	1.0609	1.0607	1.0641	1.0683	1.0734	1.0817	1.0981	1.1011	1.1113
40×40	1.0574	1.0637	1.0622	1.0620	1.0600	1.0588	1.0602	1.0634	1.0660	1.0691	1.0765	1.0809	1.0860	1.0993	1.0993	1.1112
45×45	1.0587	1.0663	1.0663	1.0634	1.0627	1.0630	1.0644	1.0663	1.0698	1.0763	1.0794	1.0932	1.1014	1.1054	1.1261	1.1265
50×50	1.0587	1.0695	1.0694	1.0682	1.0669	1.0676	1.0679	1.0687	1.0745	1.0793	1.0800	1.0946	1.1069	1.1102	1.1289	1.1378
75×75	1.0639	1.0796	1.0813	1.0840	1.0834	1.0866	1.0865	1.0978	1.1027	1.1125	1.1240	1.1356	1.1384	1.1491	1.1664	1.1671
100×100	1.0660	1.0828	1.0835	1.0867	1.0851	1.0927	1.1011	1.1106	1.1176	1.1298	1.1420	1.1579	1.1761	1.1702	1.1697	1.2099

3 信息维数与像元尺度关系分析

3.1 无标度区与像元尺度关系分析 无标度区是指分形维数有意义且相关程度最好的区间,是进行分形维数计算的重要限定参数。根据表1绘制不同像元尺度下分形信息维数与盒子尺度的关系如图3。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

从图 3 可以看出, 随着像元尺度的逐渐增大, 分形维数曲线经历了先由单调递减(a~ b) , 逐渐过度到先单调递减再单调递增(c~ f) , 最后发展到单调递增(g~ h) 的变化过程。对于单调递增情形, 其意义是随着盒子尺度的增大信息维数也增大, 这显然没有实际物理意义, 其相应的区间必然处于无标度区之外, 因此, 像元尺度大于等于 30m × 30m 的各种情形均不存在无标度区; 对于单调递减情形, 可以通过线性回归分析方法利用相关系数来分别确定相应的无标度区间, 同时可利用线性方程的截距来确定分形

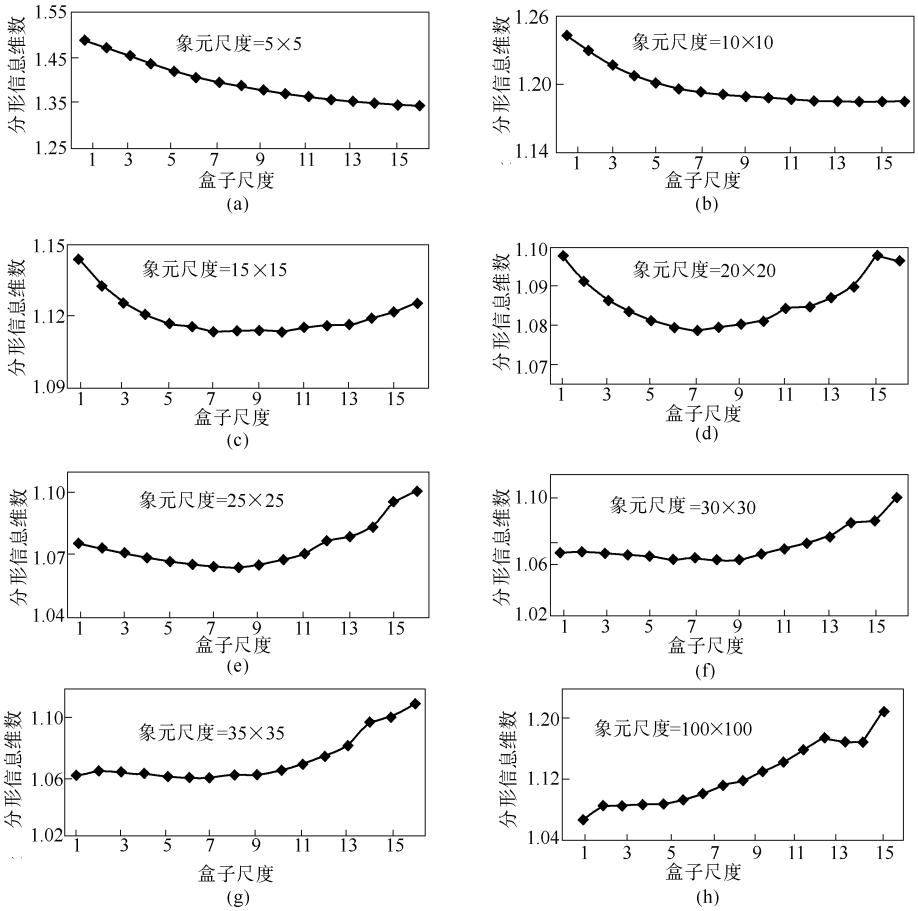


图 3　不同像元尺度下分形信息维数与盒子尺寸的关系

维数的最终值。线性回归分析的结果见表 2。

从表 2 不难看出, 像元尺度小于等于 25m × 25m 时, 即像元尺度的边长接近或小于 1 倍等高距时, 分形信息维数存在无标度区间, 此时像元尺度越小, 分形信息维数值越大, 信息维数回归相关系数越高。

表 2　弹子溪小流域地貌形态特征分形信息维数无标度区与像元尺度分析

像元尺度	R^2	点数	无标度区间	D_i
5× 5	0. 9951	7	2× 2~ 8× 8	1. 5052
10× 10	0. 9593	6	2× 2~ 7× 7	1. 2474
15× 15	0. 9473	6	2× 2~ 7× 7	1. 1444
20× 20	0. 9400	6	2× 2~ 7× 7	1. 0990
25× 25	0. 9109	6	2× 2~ 7× 7	1. 0794

3. 2　信息维数对像元尺度的敏感性分析　不同像元尺度的栅格数据所包含的地形信息量不一样的, 因此, 像元尺度是决定分形维数数值大小的重要参数。根据表 1 绘制出像元尺度与信息维数的关系曲线如图 4(盒子尺度大于 7× 7 时超出无标度区, 图形略) 。

从图 4 能看出: 像元尺度小于等于 30m × 30m 时, 即像元边长接近或小于 1 倍等高距, 信息维数随像元尺度的增大表现出单调递减的趋势; 而当像元尺度大于 30m × 30m 时, 即大于并远离 1 倍等高距时, 随着像元尺度的增大, 信息维数值基本不变化或变化很小, 也就是说此时信息维数对像元尺度的敏感性很低, 此时的像元尺度区间应视为无效区间。这说明, 进行地貌形态特征分形信息维数计算时, 像元尺度的大小必须接近或小于 1 倍等高距。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

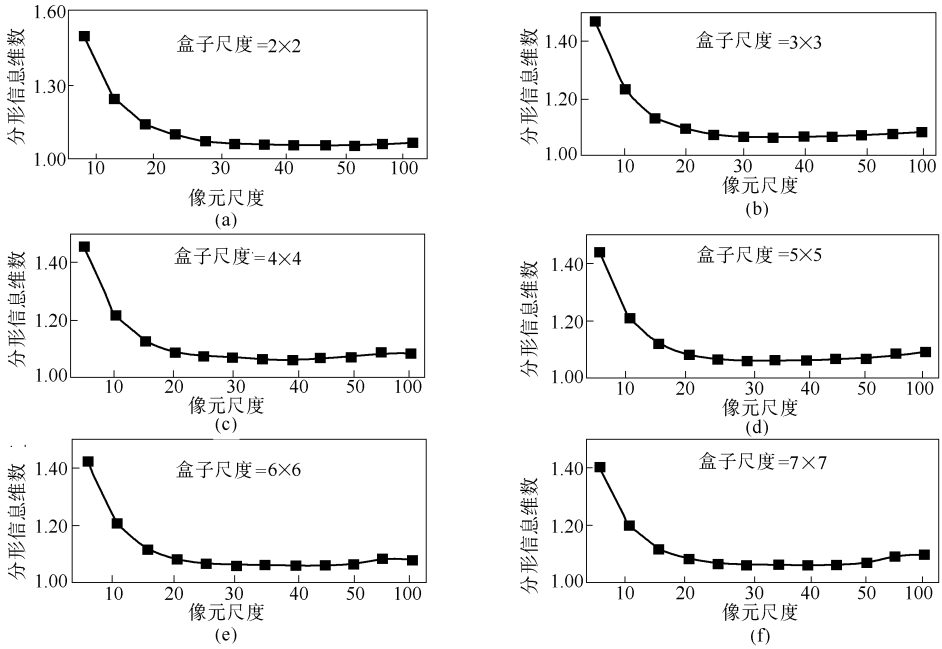


图4　像元尺度与信息维数的关系曲线

由于不同像元尺度得到的 D_i 不同, 由此可以进一步推断: 在利用分形信息维数进行不同区域地貌形态特征的计算或评价时, 应以统一像元尺度为前提, 否则不存在可比性。

4　结论

分形信息维数的计算实质上是将扫描盒子尺寸逐步趋近于零计算极限的过程, 本文通过分析这些过程值与扫描盒子、像元尺度的动态变化, 探讨分形信息维数与像元尺度的内在关系, 得出以下结论: (1) 流域地貌分形信息维数可以对流域地形地貌形态特征进行综合性、整体性和科学性的定量描述, 可以作为流域复杂地形地貌宏观性、综合性的量化指标。(2) 基于 GIS 及其应用开发模型, 可以实现地貌分形信息维数的快速计算和数据处理分析, 对于研究和量化流域或区域的地形地貌形态特征具有很好的应用价值。(3) 像元尺度的选取对于地貌形态特征分形信息维数的计算十分关键, 其值应以接近或小于一根等高距为原则, 此时像元尺度越小, 分形信息维数值越大, 回归相关系数越高; 像元尺度大于或远离一根等高距时, 不宜进行分形或分形无意义。(4) 实际计算中, 像元尺度选择在 1/4~ 1 倍等高距区间为宜, 此时信息维数相关性 $R^2 > 0.94$; 像元尺度选择过小将使数据量过大而影响计算的有效进行。(5) 进行跨流域地貌形态特征计算与评估时, 必须以统一像元尺度为前提, 否则不宜进行对比分析。本文方法与通常的在双对数坐标系内作线性回归判断分形维数值的方法相比, 其特点是信息维数对像元尺度的灵敏性较好, 便于分析, 二者计算结果存在比例系数, 但它们对于像元尺度有效性判断完全一致。事实上, 分形信息维数的影响因子不仅有像元尺度, 还有地图等高距、分形维数的指标选取、流域地貌侵蚀发育类型等, 对这些问题的深入探讨有利于全面揭示地貌形态特征的本质规律。流域地貌形态特征分形信息维数确定后, 可通过进一步研究分析其与流域侵蚀产沙等相关专题的参数的耦合关系, 建立各种应用模型, 崔灵周[11] 已进行了这方面有益的探索, 这也将是作者下一步研究的方向。

参　考　文　献:

[1]　李志林, 朱庆. 数字高程模型(第二版)[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[2] 方学敏. 通用土壤流失方程式研究进展[J]. 中国水土保持, 1993, (8): 21- 24.
[3] Li Z B, Lu K X, Ding W F. Study on the dynamic process of rill erosion on loess slope surface[J]. International Journal of Sediment Research, 2001, 16(2): 308- 314.
[4] 张光辉. 土壤水蚀预报模型研究进展[J]. 地理研究, 2001, 20(3): 275- 281.
[5] 蔡强国. 流域产沙模型概述[J]. 中国水土保持, 1990, (6): 14- 18.
[6] 尹国康, 陈钦峦. 黄土高原小流域特征性指标与产沙统计模式[J]. 地理学报, 1989, 44(1): 32- 44.
[7] 李矩章, 景可, 李凤新. 黄土高原多沙粗沙区侵蚀模型探讨[J]. 地理科学进展, 1999, 18(1): 46- 53.
[8] Andrle R. Estimating fractal dimension with the divide method in geomorphology[J]. Geomorphology, 1992, 5(1): 131- 141.
[9] Dubuc B, Zucker S W, Tricot W, *et al*. Evaluating the fractal dimension of surface[J]. Proc. Roy. Soc. London. 1989, A425: 113- 127.
[10] 艾南山, 陈嵘, 李后强. 走向分形地貌学[J]. 地理学与国土研究, 1999, 15(1): 38- 42.
[11] 崔灵周. 流域降雨侵蚀产沙与地貌形态特征耦合关系研究[D]. 杨凌: 中国科学院、水利部水土保持研究所, 2002.
[12] 张济忠. 分形[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
[13] 毛锋, 沈小华, 艾丽双. ArcGIS8 开发与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
[14] 汤国安, 陈正江, 赵牡丹, 等. ArcView 地理信息系统空间分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

Relationship between fractal dimensions of watershed topography characteristics and grid cell size

ZHU Yong-qing[1,3], LI Zhan-bin[1,2], LU Ke-xin[1], CUI Ling-zhou[4]
(1. *Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*;
2. *State key Laboratory of Soil Erosion and Dry Farming On Loess Plateau, Yangling 712100, China*;
3. *Monitoring Center Station of Changjiang Valley Water and Soil Conservation, Wuhan 430010, China*;
4. *Wenzhou Normal College, Wenzhou 325027, China*)

Abstract: The theory and method for describing the topographic characteristics of watershed by using fractal information dimension(FID) are introduced and the mathematical model based on GIS platform is proposed. The software under the circumstance of Arcview is developed and the calculation result of an example is given. It shows that the fractal information dimension can be used as a quantitative index to comprehensively describing the complicated topographic characteristics of the watershed. The size of grid cell plays important role in determining the non-scale range of FID. The calculation and evaluation of FID for inter-watershed topographic characteristics should be based on the same grid size.

Key words: fractal theory; topographic characteristics; watershed; fractal information dimension; GIS; grid cell size

(责任编辑: 韩昆)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net