

大理河流域地貌分形特征空间变异研究

王民¹, 李占斌^{1,2}, 崔灵周³, 鲁克新¹

(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. 温州大学 生命与环境科学学院, 浙江 温州 325027)

摘要: 以 1: 5 万地形图为数据源, 通过建立流域数字高程模型, 采用基于变分法的分形维数计算模型和 ArcGIS 的窗口分析功能, 对大理河流域中的 10 条子流域地貌分形维数进行了计算, 分析了其空间变异特点。结果表明, 大理河流域地貌分形维数从上游至下游呈明显增加趋势, 右岸流域地貌分形维数平均值大于左岸, 地貌分形维数较好地揭示了大理河流域地貌破碎程度和复杂程度的空间变异特点。本研究对于促进地貌分形维数在地貌学及水土流失预报等领域的应用研究具有重要意义。

关键词: 大理河流域; 变分法; 地貌分形特征; 空间变异

文献标识码: A 文章编号: 1000-288X(2008)05-0104-04 中图分类号: S157.1, P931

A Study on Spatial Variation of Geomorphologic Fractal Characters in Dali River Watershed

WANG Min¹, LI Zhanbin^{1,2}, CUI Lingzhou³, LU Kexin¹

(1. Faculty of Water Resources and Hydraulic Power, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Farming on Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. College of Life and Environment Science, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325027, China)

Abstract: Based on the topographic map of 1: 50 000, fractal dimensions and their spatial variation characteristics of 10 sub-watersheds in Dali River watershed were calculated and analyzed through the construction of digital elevation model (DEM) and by the fundamental principle of variational method and the functions of ArcGIS 9.2 Windows analysis. Results showed that the geomorphologic fractal characteristics of Dali River watershed revealed the spatial variation of topography fragmentation extend and complexity degree, with fractal dimensions increasing significantly from upper stream to down stream and the geomorphologic fractal dimension of right bank being more than that of left bank. The study is of great scientific significance to propel the application of geomorphologic fractal dimensions in the fields of geomorphology and soil and water loss.

Keywords: Dali River watershed; variational method; geomorphologic fractal characteristic; spatial variation

分形理论的提出为复杂流域地貌的定量描述提供了新思路, 成为地貌形态非线性量化研究的有力工具^[1]。Mandelbrot^[2]通过研究河网主河道长度与流域面积之间的关系, 指出河网主河道具有分形结构。D. G. Tarboton^[3-5]等分别用尺子法、盒盖法和超出数概率法研究了水系的分形特征, 并得出了整个水系的分形值趋于 2。李镭、崔灵周和朱永清^[6-9]等分别用尺度法探讨了天山地区不同地貌类型的地形等高线的分形特征, 利用盒维数分别对岔巴沟流域和弹子溪流域的等高线的分形维数进行了测算。可以看

出, 目前对于流域地貌分形特征的研究主要通过对水系和等高线分形维数的测算来实现, 对于以此揭示典型流域地貌形态分形特征空间变化等应用研究还很少涉及。本文以黄土高原丘陵沟壑区的典型流域大理河为研究对象, 以基于极差原理, 被认为是求算分形最可靠和准确的变分法^[10-13]为地貌分形维数计算模型, 利用 1: 5 万地形等高线建立大理河流域的地貌数字高程模型 DEM, 对该流域中的 10 条子流域地貌分形维数进行了计算并分析了其空间变异规律。本研究对于促进地貌形态分形维数的应用研究, 实现

收稿日期: 2008-03-04

修回日期: 2008-08-08

资助项目: 国家自然科学基金项目(40301026); 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB407206); 国家科技支撑项目(2006BAD09B02)

作者简介: 王民(1973—), 男(汉族), 河南省唐河县人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀和水土保持方面的研究。E-mail: thwmg@126.com。

通信作者: 崔灵周(1971—), 男(汉族), 陕西省蓝田县, 博士后, 主要从事流域地貌分形特征量化模型等方面研究工作。E-mail: clingzhou@126.com。

小流域侵蚀产沙预报模型中地貌因子的科学准确量化具有重要科学意义。

1 大理河流域概况

大理河流域位于东经 $109^{\circ}14' - 110^{\circ}13'$, 北纬 $37^{\circ}30' - 37^{\circ}56'$, 总面积 $3\ 873\ \text{km}^2$, 全长 $170\ \text{km}$, 是无定河最大的一级支流。流域内地面切割破碎, 地形起伏较大, 沟谷密度达 $4 \sim 6\ \text{km}/\text{km}^2$, 属晋陕黄土阶状丘陵沟壑区。大理河流域的地貌类型可划分为两种, 即黄土梁壩河源丘陵沟壑区(简称河源区)和黄土梁阶丘陵沟壑区(简称丘陵区)。其中青阳岔以上的上游段为河源区, 包括靖边县的绝大部分, 安塞县的全部和横山县的部分地区, 占流域总面积的 28.1% ; 该区由于新构造上升运动较强烈, 沟道河流下切严重, 多形成窄深的 V 字形槽谷, 谷坡坡度多在 40° 以上, 沟谷密度为 $4 \sim 5\ \text{km}/\text{km}^2$ 。青阳岔至周家硷的中游段和周家硷至绥德的下游段属于丘陵区, 该区沟壑纵横, 梁阶起伏, 支离破碎, 沟谷密度达 $5 \sim 6\ \text{km}/\text{km}^2$, 沟深可达 $100 \sim 150\ \text{m}$ 。大理河左右两岸地貌形态差异明显, 右岸地貌的破碎程度大于左岸。

2 研究方法

2.1 子流域选取

根据大理河流域的地貌类型及空间分布特点, 在大理河流域的上游、中游和下游区共选取了 10 个子流域作为研究小流域, 其空间分布及特征统计见表 1。可以看出, 上游区选择了 2 个子流域, 分别是清水河和王家湾沟, 均属于河源丘陵沟壑区; 清水河和王家湾子流域分别位于大理河的左岸和右岸, 流域面积依次为 199 和 $115\ \text{km}^2$, 沟谷密度分别为 $4.761\ 2$ 和 $5.212\ 4\ \text{km}/\text{km}^2$ 。中游区选择了 4 个子流域, 分别是石乔沟、大水沟、马义河和大堡岔子流域, 均属于梁阶丘陵沟壑区; 其中石乔沟和大堡岔子流域位于大理河右岸, 其余位于左岸; 马义河子流域面积最大, 为 $211\ \text{km}^2$; 大水沟子流域面积最小, 为 $81\ \text{km}^2$; 石乔沟子流域的沟谷密度最大, 为 $5.301\ 2\ \text{km}/\text{km}^2$, 大水沟子流域的沟谷密度最小, 为 $4.961\ 2\ \text{km}/\text{km}^2$ 。下游区也选择 4 个子流域, 分别是艾好茆、石窑沟、南驼耳巷沟和周坨崂子流域, 属于梁阶丘陵沟壑区; 其中艾好茆和石窑沟位于左岸, 其余位于右岸; 南驼耳巷沟子流域面积最大, 为 $234\ \text{km}^2$; 周坨崂子流域面积最小, 仅为 $61\ \text{km}^2$; 艾好茆子流域的沟谷密度最大, 为 $5.218\ 8\ \text{km}/\text{km}^2$, 周坨崂子流域的沟谷密度最小, 为 $5.091\ 2\ \text{km}/\text{km}^2$ 。

2.2 变分法计算分形维数基本原理

变分法是基于数学理论中变分思想, 用极差值

原理求解三维表面的分形维数。设某三维表面 S 为二元函数 $z = f(x, y)$ 的图像, 且 $a \leq x \leq b, c \leq y \leq d$ 。对于一实数 ε 函数 f 在 (x, y) 点的 ε 振动可定义为 f 在 (x, y) 的 ε 邻域的两个极值之差, 即:

表 1 大理河 10 条研究子流域特征统计表

子流域名称	流域面积/ km^2	沟谷密度/ $(\text{km} \cdot \text{km}^{-2})$	所属左岸/ 右岸	所属 河段	所属地貌 类型区
清水河	199	4.761 2	左岸	上游	河源丘陵 沟壑区
王家湾沟	115	5.212 4	右岸		
石乔沟	89	5.301 2	右岸	中 游	梁阶丘陵 沟壑区
大水沟	81	4.961 2	左岸		
马义河	211	4.974 9	左岸		
大堡岔	125	5.118 8	右岸		
艾好茆	118	5.218 8	左岸	下 游	梁阶丘陵 沟壑区
石窑沟	190	5.187 6	左岸		
南驼耳巷沟	234	5.200 5	右岸		
周坨崂	61	5.091 2	右岸		

$$V_f(x, y, \varepsilon) = \sup |f(x_1, y_1) - f(x_2, y_2)| \quad (1)$$

式(1)中, 上确界 \sup 对所有 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 数对取值, 且 $\max(|x_1 - x_2|, |y_1 - y_2|) \leq \varepsilon$ 。

则函数 f 的 ε 变分为

$$V_f(\varepsilon) = \int_a^b \int_c^d V_f(x, y, \varepsilon) dx dy \quad (2)$$

对所有非正常函数 f , 可定义三维连续表面 S 的闵可夫斯基维数(Minkowski Dimension) D_M , 即

$$D_M = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} (3 - \frac{\lg V_f(\varepsilon)}{\lg \varepsilon}) \quad (3)$$

由式(2)和(3)可以看出, 二元函数 f 的 ε 变分 $V_f(\varepsilon)$ 是该函数在 (x, y) 点的 ε 振动 $V_f(x, y, \varepsilon)$ 在 $x \in [a, b]$ 和 $y \in [c, d]$ 上的二重积分, 即为三维表面 S 在上述区间内的体积 $V(\varepsilon)$ 。要获取三维表面 S 的地貌分形维数 D_M , 只要在所给定的 ε 条件下, 计算出三维表面 S 在相应区间内的体积 $V(\varepsilon)$; 然后以 ε 为尺度, 以 $V(\varepsilon)$ 为测度, 利用最小二乘法即可得到三维表面 S 的分形维数 D_M 。

2.3 基于 GIS 的流域地貌分形维数计算实现过程

根据变分法计算三维表面分形维数的基本原理, 本研究以 1: 5 万地形图为数据源, 经过地形图扫描, 几何纠正, 影像二值处理与细化, 等高线矢量化, 数据接边, 构建不规则三角网(TIN)和 DEM 的生成等步骤得到 10 个研究子流域的地貌数字高程模型 DEM。然后采用 ArcGIS 9.2 软件中的窗口分析功能, 分别以 2, 3, 4, 5, ..., 70 倍初始栅格尺寸(10 m)为分析窗

口大小 ε 连续遍历所获得子流域地貌高程栅格数据; 在分析窗口的不同位置, 求取进入该分析窗口的栅格高程最大值与最小值的极差值, 记录该分析窗口位置及对应的高程极差值, 依此得到分析窗口在遍历子流域地貌栅格数据过程中的所有位置及高程极差值。然后以分析窗口大小为栅格尺寸, 以所获高程极差值为对应栅格的新高程值, 生成子流域的数字高程极差模型, 并计算出其体积 $V(\varepsilon)$ 。依次类推, 生成不同分析窗口大小所对应子流域的数字高程极差模型及体积 $V(\varepsilon)$ 。最后利用最小二乘法, 将所获得的一系列 $\lg\varepsilon$ 和 $\lg V(\varepsilon)$ 点绘在双对数坐标下, 设无标度区内的直线斜率 β , 则子流域三维地貌分形维数 D_M 可由式(4)得到。

$$D_M = 3 - \beta \quad (4)$$

3 结果分析

3.1 大理河流域上、中及下游区地貌分形特征

表 2 是以大理河流域 1: 5 万 DEM 为基础数据, 利用上文所提出的基于变分法和 GIS 的流域地貌分形维数计算原理和实现过程, 所得到的大理河 10 条研究子流域的地貌分形维数。可以看出, 10 条研究子流域在无标度区内, 分析窗口尺度 ε 和对应的小流域模型体积 $V(\varepsilon)$ 在双对数坐标下直线回归的相关指数很高, 均保持在 0.998 0 以上, 最大可达 0.998 6, 这表明各研究子流域的地貌形态在各自的无标度区内具有十分显著的分形特征。无标度区间基本保持在 110~ 650 m 范围内。

就上、中及下游区各研究子流域的分形维数而言, 最大分形维数出现在下游的石窑沟子流域, 为

2.473 3; 最小分形维数出现在上游的清水河子流域, 为 2.261 3, 二者相差 0.212 0。上游区子流域的地貌分形维数总体偏小, 平均值仅为 2.300 6; 中游区子流域的地貌分形维数居中, 平均值为 2.412 4, 高出上游区 0.111 8; 下游区子流域的地貌分形维数最大, 平均值达 2.449 1, 分别比中游区和上游区地貌分形维数平均值高 0.148 5 和 0.036 7。各研究子流域地貌分形维数的这种变化趋势与常规地貌参数沟谷密度变化特点基本相似(图 1—2), 即先呈波动增长, 然后再略微下降。这表明, 地貌分形维数所揭示的大理河流域地貌形态空间分布特征与沟谷密度具有较好的一致性和吻合性。因此, 以分形维数作为流域地貌形态量化参数可以定量揭示地貌形态的复杂度及破碎度等空间分异特征。

表 2 大理河流域上、中及下游区地貌分形维数计算结果

子流域位置	子流域名称	无标度区/m	拟合直线 R^2	地貌分形维数 D_M	分形维数平均值
上游	清水河	110~ 590	0.998 4	2.261 3	2.300 6
	王家湾沟	160~ 590	0.998 6	2.339 9	
	石乔沟	170~ 590	0.998 1	2.467 8	
中游	大水沟	170~ 610	0.998 5	2.304 4	2.412 4
	马义河	200~ 590	0.998 1	2.412 1	
	大堡岔	220~ 530	0.998 4	2.465 1	
	艾好卯	170~ 480	0.998 3	2.418 7	
下游	石窑沟	200~ 630	0.998 6	2.473 3	2.449 1
	南驼耳巷	270~ 650	0.998 6	2.458 4	
	周坨崂	230~ 620	0.998 1	2.446 1	

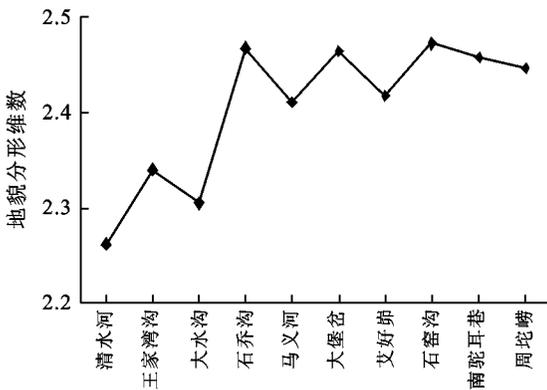


图 1 大理河流域各子流域地貌分形维数变化

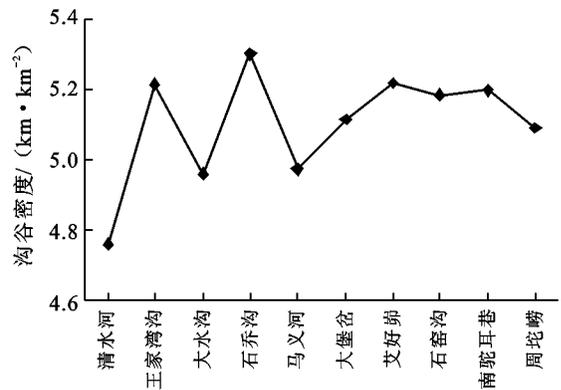


图 2 大理河流域各子流域沟谷密度变化

3.2 大理河流域左岸和右岸地貌分形特征

图 3—4 是大理河流域左右两岸各子流域地貌分形维数从上游到下游的变化图。可以看出, 大理河流域左右两岸各子流域地貌分形维数从上游到下游均呈

增加趋势, 但左岸子流域地貌分形维数变化接近直线增加, 即从上游清水河子流域的 2.261 3 增加至下游石窑沟流域的 2.473 3, 平均增幅为 2.34%; 右岸子流域地貌分形维数变化呈明显的波动增加, 即地貌分形维

数从上游王家湾沟子流域的 2.339 9 增加到中游石乔沟子流域的 2.467 8, 增幅达 5.47%; 然后小幅下降至周坨崂子流域的 2.446 1, 总体增加幅度为 4.54%。就地貌分形维数的平均值来看, 大理河右岸各子流域分形维数平均值为 2.435 5, 稍大于左岸子流域的平均值 2.373 9。可见, 大理河左右两岸地貌分形维数从上游到下游均呈增加趋势, 右岸明显大于左岸。

大理河流域左右两岸地貌分形维数的上述差异是该流域左右岸地貌复杂程度空间变化的集中体现。从常规地貌参数沟谷密度的变化就可以明显看出(表

1), 左岸的清水河、大水沟、马义河、艾好卯和石窑沟 5 个子流域的沟谷密度分别为 4.761 2, 4.961 2, 4.974 9, 5.218 8 和 5.1876 km/km², 其平均值为 5.020 7 km/km²; 右岸的王家湾沟、石乔沟、大堡岔、南驼耳巷沟和周坨崂 5 个子流域的沟谷密度分别为 5.212 4, 5.301 2, 5.118 8, 5.200 5 和 5.0912 km/km², 其平均值为 5.184 8 km/km², 右岸沟谷密度平均值大于左岸。因此作为流域地貌形态复杂程度常规量化指标的沟谷密度, 对于大理河流域左右岸地貌分形维数的空间变化具有重要影响。

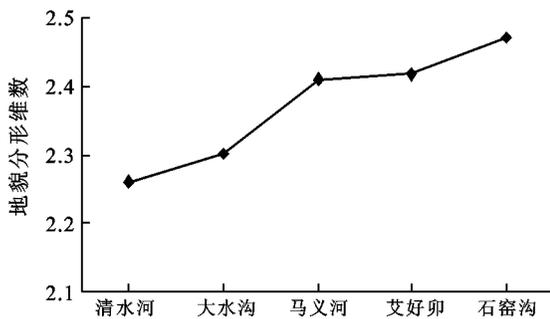


图 3 大理河流域左岸地貌分形维数变化

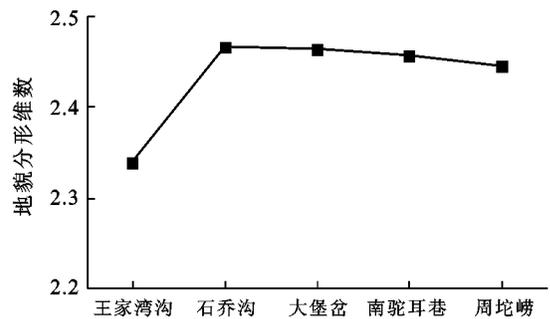


图 4 大理河流域右岸地貌分形维数变化

4 结 论

(1) 基于变分法的分形维数计算模型可为直接测算具有三维立体空间特征的流域地貌分形维数提供新途径, 对于促进流域地貌分形特征直接量化研究具有重要科学意义。

(2) 大理河流域地貌分形维数从上游至下游呈明显的增加趋势, 右岸地貌分形维数平均值大于左岸, 这种变化特点与常规地貌量化因子沟谷密度的变化趋势大体一致, 表明地貌分形维数可以较好地揭示该流域地貌的破碎程度和复杂程度及其空间变化。

[参 考 文 献]

[1] 张捷, 包浩生. 分形理论及其在地貌学中的应用: 分形地貌学研究综述及展望[J]. 地理研究, 1994, 13(3): 104—111.

[2] Mandelbrot B. Fractal Form, Chance and Dimension [M]. San Francisco: Freeman, 1977.

[3] Tarboton D G, Bras R L, et al. The fractal nature of river networks [J]. Water Resources Research, 1988, 24(8): 1317—1322.

[4] Garcia J M, Otolara F. Fractal trees and horton's law [J]. Math Geol., 1992, 24(1): 212—217.

[5] Nikora V I. Fractal structures of river plan forms [J]. Water Resources Research, 1991, 27(6): 1327—1333.

[6] 李猛, 朱令人. 地形等高线的分形特征及其动力学含义 [J]. 西北地震学报, 2002, 24(2): 97—1032.

[7] 崔灵周, 李占斌, 朱永清, 等. 基于分形信息维数的流域地貌形态与侵蚀产沙关系[J]. 土壤学报, 2007, 44(2): 197—203.

[8] 崔灵周, 李占斌, 肖学年. 岔巴沟流域地貌形态分形特征量化研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(2): 41—44.

[9] 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.

[10] Dubuc B, Zucker S, Tricot C, et al. Evaluation the fractal dimension of surfaces [J]. Proc. R. Soc. Lond. A, 1989, 425(1): 113—127.

[11] Dubuc B, Quiniou J, Tricot C, et al. Evaluating the fractal dimension of profiles [J]. Phys. Rev. A, 1989, 39(3): 1500—1512.

[12] Spanos L, Irene E A. Investigation of roughened silicon surfaces using fractal analysis. I. Two dimensional variation method [J]. J. Vac. Sci. Technol, 1994, 12(5): 2646—2652.

[13] 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): 92—96.