

DEM 地形复杂度指数及提取方法研究

王雷¹, 汤国安^{2,1}, 刘学军², 龙毅², 王春¹

(1. 西北大学 城市与资源学系, 陕西 西安 710069;

2. 南京师范大学 地理信息科学江苏省重点实验室, 江苏 南京 210097)

摘要: 在充分阐述各种地形信息表达方式的基础上, 提出了基于栅格 DEM 的地形复杂度指数的概念与计算方法。研究结果认为, DEM 的地形复杂度指数是描述地形变化程度的综合指标。可以在一个 3×3 窗口中, 通过提取栅格中心点与其邻域栅格所组成的相邻的空间平面之间的夹角来表示。根据在陕北黄土丘陵沟壑区 1:5 万 DEM 的试验结果显示, 该方法所提取的地形复杂度指数, 可有效地描述该类 DEM 信息源的地面形态变化情况。该研究结果为进一步深入探讨 DEM 地形信息量的概念体系, 以及地形信息量的空间分异规律及其随空间尺度(比例尺、栅格分辨率)变化的规律创造了重要的条件。

关键词: DEM; 地形; 复杂度

文献标识码: B

文章编号: 1000—288X(2004)04—0055—04

中图分类号: P283.1

Terrain Complexity Index and Its Derivation from DEMs

WANG Lei¹, TANG Guo-an^{2,1}, LIU Xue-jun², LONG Yi², WANG Chun¹

(1. Department of Urban and Resource Sciences, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi Province, China;

2. College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, Jiangsu Province, China)

Abstract: Based on an overall analysis of the methodology and technique for the description of terrain information representation, the TCI(Terrain Complexity Index), a new concept and quantification method for terrain complexity is proposed. TCI is a comprehensive index revealing the complexity and variation of true surface, which could be extracted via a calculation of an angle between two conjunct surfaces from a 3 by 3 cells based analysis window. Experiments show that the TCI matrix derived from 1:50 000 map scale DEMs could effectively represent the variation of the DEM based model surface. This research provides a good basis for constructing the conception system, as well as investigating the spatial distribution pattern of terrain information content.

Keywords: DEM; terrain; complexity

地形、地貌要素是最基本的自然地理单元, 地形的起伏与变化特征直接影响地表物质迁移与能量转换的方式、规模与速率, 制约着地表过程的进程、发展方向及地面景观的形成。目前, 数字高程模型(Digital Elevation Models, 简称 DEM) 因其较之等高线更有利于数字地形分析而成为地形表达的主要信息源。如何利用 DEM 有效地提取不同的地形信息, 如何既定性又定量地从宏观与微观不同的层面有效地反映地面起伏变化的规律与特征, 一直是人们关注的热点。目前基于 DEM 已经有了诸多定量地形因子, 如坡度、坡向、坡长、剖面曲率、平面曲率、地面起伏度、地面粗糙度等^[1-3], 这些因子分别从不同的侧面揭示了地面形态特征, 但还没有一个因子能够综合地反映 DEM 所能描述的地面变化特征。

Wischmeier 和 Smith (1965) 提出的通用水土流失方程 USLE^[4-8] 中, 用 LS 表示地形因子对土壤侵蚀的贡献量; Beven 和 Kirkby (1979) 提出的 TOP-MODEL^[9-13] 模型中, 使用地形指数(terrain index) 来有效地反映地形对流域产流面积的影响。虽然该二因子具有一定的综合地形分析的特征, 但仍不是直接地反映地面的形态变化。剖面曲率(profile curvature) 和平面曲率(plane curvature)^[1-3, 14] 可有效反映地面的坡形与变化特征, 但由于这 2 种指标分别在垂直与水平 2 个空间维度上描述地面的坡形变化, 不能综合反映地形的空间变化特征, 同时, 这 2 种指标的计算方法较为复杂, 在 DEM 上的实现有一定的困难。汤国安提出用坡度变率与坡向变率来替代剖面曲率与平面曲率反映地面的形态变化特征^[1], 但这种方

收稿日期: 2004-02-08 修回日期: 2004-04-09

资助项目: 国家自然科学基金项目(40271089); 国家自然科学基金项目(40301027); 教育部科研基金重点项目(01111)

作者简介: 王雷(1977—), 男(汉族), 陕西兴平人, 硕士研究生, 主要从事 GIS 方面的研究工作。电话(029)88307176, E-mail: montez@163.com。

法仍然是将地面的形态变化分解到垂直与水平 2 个空间维度上,也不能综合反映地面形态变化特征。

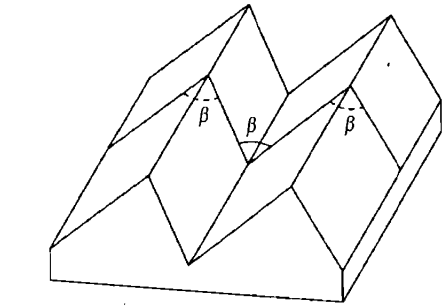
本文定义一种新的能够直接反映地面坡形变化的量化指标——地形复杂度指数。即通过研究一个 3×3 栅格窗口内,中心栅格与其 8 个邻域栅格之间所构成的空间平面关系,直接度量地面形态特征与变化。试验结果显示,地形复杂度指数不但能够用于度量坡面形态的复杂程度,也高度浓缩了地面形态信息,为进一步深入探讨 DEM 地形信息量的概念体系,以及地形信息量的空间分异规律及其随空间尺度变化的规律创造了重要的条件。

1 栅格 DEM 地形复杂度指数的描述

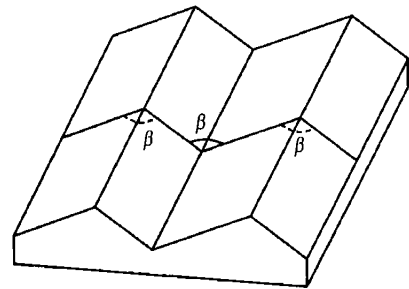
数字高程模型 (DEM) 是一种重要的地形表达方式,其主要形式有规则格网 (GRID), 不规则三角网 (TIN), 数学曲面等^[3]。其中规则格网形式的 DEM, 即栅格 DEM 因其数据结构简单, 空间分析方法简便而成为最常用的 DEM 的形式。在栅格 DEM 的基础上, 研究地面形态变化特征, 需要设计一种能够适应该种数据将空间离散化特点的算法, 来量化地表达地面形态的起伏变化特征。

研究地面形态的变化, 首先要分析地表面在哪些部位发生了变化。邹豹君认为, 陆地的表面是无数坡的集合面^[15]。从这一点出发, 可以将地面分解为无数单纯的直形坡, 即无数个具有单一坡度的坡面。对于每一个这样的坡面来讲, 在其坡面内, 地面形态没有发生变化。只有当从一个坡面转移到相邻坡面上的时候, 地面的形态才发生了变化。根据这一观点, 地面形态的变化部位主要集中在坡度与坡向发生变化的地方, 如坡脚线、沟沿线、谷底线等。研究表明^[1-3, 14], 通过计算 DEM 的剖面曲率与平面曲率或是计算坡度与坡向的变化率, 可以得到坡度与坡向的变化。这样做的好处是将复杂的变化分解到 2 个垂直的空间维度上, 使问题得到了简化。但同时也人为地割裂了地面的实际变化情况, 增加人们的认知与分析难度。

事实上, 在坡面发生变化的地方, 即相邻 2 个坡面交界的地方, 有一个量值可以代表地面形态的变化, 那就是相邻 2 个坡面的空间二面角。如图 1 所示, 空间二面角 β 有以下 2 种表现形式图 1a 表示, 两相邻空间坡面的夹角为锐角, 说明在 2 个空间坡面间地面形态发生了较为显著的变化。图 1b 表示两相邻空间平面的夹角为钝角, 说明 2 个空间坡面间的变化较小。如果能够将 DEM 中相邻两空间坡面的空间二面角计算出来, 就可以得到地形变化的情况。



(a) 锐角情况的二面角



(b) 钝角情况的二面角

图 1 相邻二面角形式

根据栅格 DEM 的特点, 设计一个 3×3 的空间窗口, 以中心栅格为坐标原点, 按右手系建立一个空间直角坐标系, 那么中心栅格与它的 8 个邻域栅格就在这一坐标系中构成了 8 个空间平面, 计算每 2 个相邻的空间平面的夹角 β_i (如图 2), 然后求这样 8 个二面角的加和 β_i , 作为中心栅格的值, 用它来反映坡面的转折变化。但是根据空间二面角公式(1)进行反余弦运算得到的 β 值永远是锐角。

$$\cos \beta = \frac{|a_1 a_2 + b_1 b_2 + c_1 c_2|}{\sqrt{(a_1^2 + b_1^2 + c_1^2)(a_2^2 + b_2^2 + c_2^2)}} \quad (1)$$

式中: (a_1, b_1, c_1) —— 第 1 个空间平面的法向量; (a_2, b_2, c_2) —— 第 2 个空间平面的法向量。

这时需要针对图 1 所示的 2 种情况进行判断。图 2, (1) 得到过 H_2 点并与 XOY 面垂直的空间直线 (记为 L) 的直线方程, 并记 H_2 点的 Z 坐标为 Z_0 ; (2) 计算第 1 个面 $H_1 O H_1$ 与空间直线 L 的交点的 Z 坐标, 记为 Z_1 ; (3) 得到与第一个面 $H_1 O H_1$ 垂直并通过 $O H_1$ 的空间平面 (记为 $H_1 O H_1$) 的平面方程, 并且计算该平面与空间直线 L 的交点的纵坐标, 记为 Z_2 ; (4) 通过判断 Z_0, Z_1, Z_2 的大小关系来判别空间二面角的形状: 如果 $Z_2 > Z_1$, 则例如图 3a 所示, 当 $Z_0 > Z_2$ 时, 则二面角为锐角, 当 $Z_2 > Z_0 > Z_1$ 时为钝角, 当 $Z_0 < Z_1$ 时二面角仍为钝角, 只是两坡面组成的凹凸关系发生变化 (由凹变凸)。

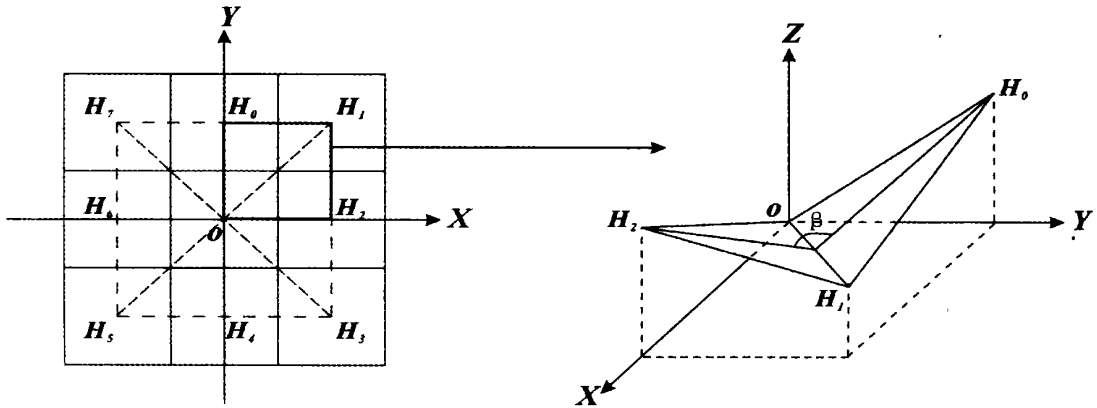


图 2 以中心栅格为坐标原点的空间坐标系及空间二面角

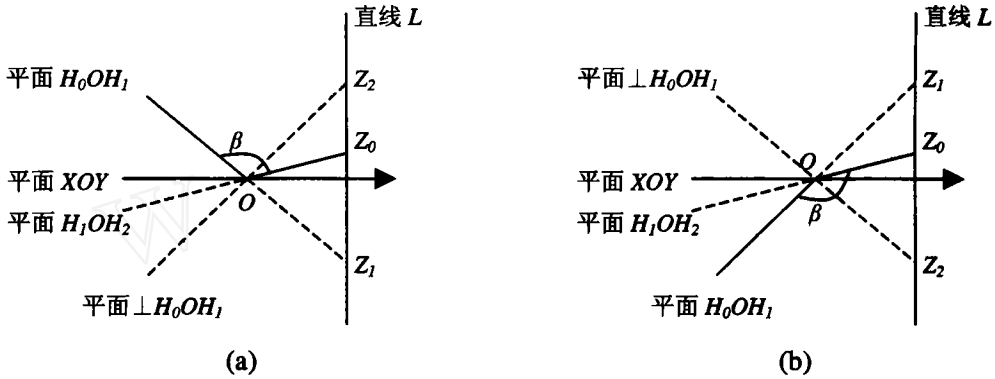


图 3 二面角形状判断

如果 $Z_1 > Z_2$, 则如图 3b 所示, 当 $Z_0 < Z_2$ 时, 则二面角为锐角, 当 $Z_1 > Z_0 > Z_2$ 时为钝角, 当 $Z_0 < Z_1$ 时二面角仍为钝角, 只是两坡面组成的凹凸关系发生变化(由凸变凹)。

根据对图 1 的分析, 相邻 2 个空间坡面夹角为锐角时, 说明 2 个空间坡面间发生了较为显著的变化, 为钝角时, 变化较小。为了能够使变化较大的情况得到较大的量值来反映, 在计算两相邻空间平面的夹角时作如下规定: 对所有计算出的角度 β_i^* 取它们的补角 β_i^* , 然后再求这些补角的和 β_i^* 。

在计算的时候, 每一个角值均使用弧度值。同时, 为了便于进行统计分析, 需要考虑对计算的结果进行处理, 这种数据处理要满足以下几个条件: 处理前后数据的规律没有发生变化; 消除数据量纲; 使数据的数值对最终结果的影响不会显著偏大或偏小; 基于以上考虑, 对计算的结果进行正规化处理^[16]。具体的处理方法可按 (2) 式进行:

$$d_{ij}^* = \frac{d_{ij} - \min\{d_{ij}\}}{\max\{d_{ij}\} - \min\{d_{ij}\}}$$

$$i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中: d_{ij} ——计算得到的每一栅格上的结果; d_{ij} ——正规化以后的结果; i ——栅格行号; j ——栅格列号。

2 实验结果与分析

根据上述的方法, 选取了一幅 DEM 作为样区进行计算, 该样区属于典型的黄土丘陵沟壑区, 数据的基本情况如表 1 所示

表 1 试验数据基本情况

比例尺	1 50 000	行数	767	最小高程	1 112.0
分辨率/m	25	列数	927	最大高程	1 659.3

对计算结果进行分析可以看出(如图 4), 只要坡面发生转折, 无论是在哪一个方向上, 计算的结果都

可以得到体现。计算出的地形复杂度指数既能够反映坡面在水平方向上的变化(谷底线、山脊线),也可以反映坡面在垂直方向上的变化(坡度发生变化的地方,如沟沿线、卯边线)。

根据对计算出的数值大小的分析,在山脊线、谷底线以及卯边线、沟沿线等坡面发生显著转折的部位,得到的值较大,尤其是在那些宽度较小,深度较大的沟谷底部和那些狭长的梁顶部。

在比较平坦的沟谷底部和梁卯顶部,所得到的地形复杂度指数值较小。对于相对均一的坡面,得到的值也相对较小。由于该试验样区位于典型的黄土丘陵沟壑地区,坡面在谷底与山脊处的转折比在沟沿与卯边的转折大,因此在谷底线与山脊线得到值相对来讲较沟沿线与卯边线的值大,而沟沿线与卯边线的值相对来讲比谷坡上的值大,谷坡上的值比谷底与梁卯顶部的值大。

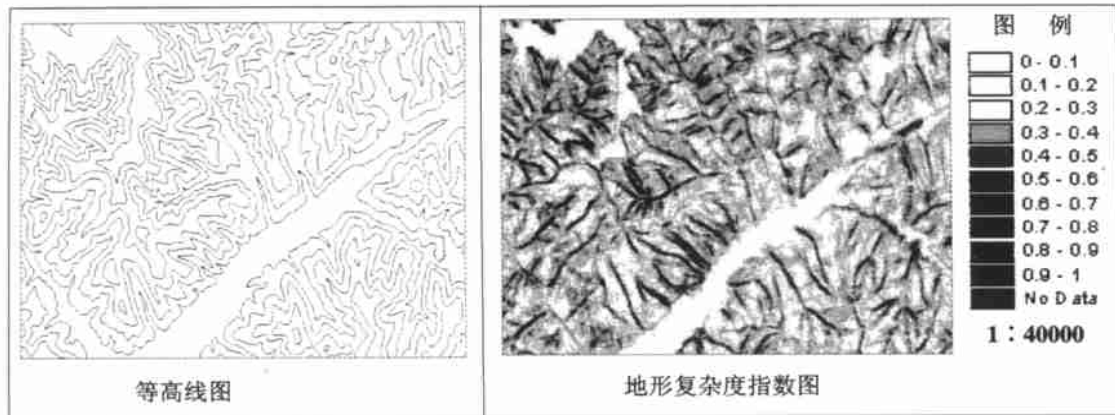


图 4 试验样区地形复杂度指数

3 结 论

地形复杂度指数的提取方法简单,数学含义与地学含义明确,便于计算机算法设计与程序实现;基于DEM 3×3 栅格分析窗口内所构建的二面角,以无量纲参数有效地综合了坡度变率、坡向变率、地面曲率等多项地面起伏变化特征,可定义为地形复杂度指数(Terrain Complexity Index, 缩写为TCI)。

在黄土丘陵沟壑区试验样区所提取的地形复杂度指数地图显示,TCI量值在微观上可有效反映地面起伏的局部变化,在宏观上可揭示地形复杂度的区域分异特征与规律。

[参 考 文 献]

[1] 朱红春. 数字高程模型(DEM)空间数据挖掘研究——以在陕北黄土高原的实验为例[D]. 西安: 2003

[2] 汤国安, 杨玮莹, 杨昕, 等. 对DEM地形定量因子挖掘中若干问题的探讨[J]. 测绘科学, 2002, 28(1): 28—31.

[3] 李志林, 朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2001.

[4] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [M]. Agriculture Handbook, No. 537 U SDA, 1978

[5] 章文波, 谢云, 刘宝元, 等. 降雨侵蚀力研究进展[J].

水土保持学报, 2002, 16(5): 43—46

[6] 沈大勇, 马蔼乃, 林琿, 等. 坡面土壤水蚀建模方法比较[J]. 北京大学学报(自然版), 2002, 38(6): 118—121.

[7] 符素华, 刘宝元. 土壤侵蚀量预报模型研究进展[J]. 地球科学进展, 2002, 17(7): 78—84

[8] 张光辉. 土壤水蚀预报模型研究进展[J]. 地理研究, 2001, 20(3): 274—281.

[9] Beven K, Kirkby M J. A Physically based, variable contributing area model of basin hydrology [J]. Hydro Sci Bull, 1979, 24: 43—69

[10] 刘青娥, 左其亭. TOPMODEL 模型探讨[J]. 郑州大学学报(工学版), 2002, 23(4): 82—86

[11] 孔凡哲, 芮孝芳. TOPMODEL 地形指数计算方法探讨[J]. 水科学进展, 2003, 14(1): 41—45

[12] 任立良, 刘新任. 基于DEM的水文物理过程模拟[J]. 地理研究, 2002, 19(4): 82—86

[13] 邓慧平, 李秀彬. 地形指数的物理意义分析[J]. 地理科学进展, 2002, 21(2): 104—110

[14] LU Guo nian, Q IAN Ya- dong, CHEN Zhong- ming. Automated extraction of the characteristics of topography from grid digital elevation data [J]. Acta Geographica Sinica 1998, 53(6): 562—569

[15] 邹豹君. 小地貌学原理[M]. 北京: 商务印书馆 1985

[16] 张超, 杨秉庚. 计量地理学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 1984