

地形复杂度的多因子综合评价方法

卢华兴¹, 刘学军², 汤国安²

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 南京师范大学 地理科学学院, 江苏 南京 210097)

摘 要: 地形复杂度指标(Terrain Complexity Index, TCI)是评价地表起伏和褶皱程度的指标,广泛应用于 DEM 数字地形分析、数据综合和建模、地貌分类以及 DEM 精度研究等领域。然而目前地形复杂度指标多数采用单一地形指标或区域统计指标,缺乏局部的复合评价指标。为此,引入多因子分析方法和局部窗口分析方法,探讨一种基于格网 DEM 数据的复合地形复杂度指标(Compound Terrain Complexity Index, CTCI)的建模方法。首先利用多因子评价方法选取 4 种局部地形因子(局部高差、局部标准差、局部褶皱度、局部全曲率),之后利用局部窗口分析方法获取各指标的计算值,最后融合 4 种因子得到每个格网的 CTCI。在实验分析中,选取了 3 个典型地貌样区和 1 个混合地貌样区,实验结果表明:CTCI 能从整体上区分不同典型地貌区的地形复杂程度,同时 CTCI 在局部范围与混合地貌样区的等高线的密度和变化程度有较好的吻合,表明 CTCI 能从整体和局部反映地表的起伏和褶皱变化,是较好的地形复杂度评价指标。

关键词: DEM; 地形复杂度; 多因子分析

中图分类号: P931

文献标识码: A

地形复杂度是描述地表崎岖程度的指标,它不仅是数字地形分析中的重要参数,还广泛地应用在地形数据压缩^[1]、地形分类与可视化^[2]、土地利用与土壤侵蚀^[3]、地形分析不确定性^[4]、生物多样性评估^[5-6]、DEM(Digital Elevation Model, DEM)采样策略和精度评估^[7-11]等领域,建立地形复杂度指标评价体系将为生态、环境保护、灾害评估等应用提供决策支持信息。

地形复杂度是非确定性指标,其量化描述往往具有模糊性,就目前的研究来看,多数采用几何方法和统计方法,其中统计指标主要有地形起伏度^[12]、高程方差和标准差^[12-13]、空间自相关^[14]、等高线和河网密度^[15]、平均坡度坡向等等,而几何方法主要有表面面积比^[16-17]、地表曲率^[18]、分形维^[19]、坡度坡向变率^[20-21]等等。地形复杂度具有区域和局部双重特征,区域统计指标(如最大、最

小、平均值、方差等等)能从整体上反映研究区域的整体地形起伏和褶皱程度,但是无法精细化地刻画地形局部复杂程度,而单一指标在刻画地表形态复杂程度上往往缺乏全面性,本文尝试采用多因子综合评价方法建立基于格网 DEM 的局部地形复杂度模型,并通过实验方法检验模型的有效性。

1 地形复杂度建模

1.1 复杂度因子选择

单一地形因子是对地形几何特征的刻画,不同地形复杂度因子从不同角度反映了地表变化程度,在因子选择上应考虑以下因素:

1. 相对独立性:根据多因子分析理论(Multivariable Analysis),候选因子应尽量保持因子之间相对独立,即因子之间不能存在极大的相关性,就地形复

收稿日期(Received date): 2011-11-30; 改回日期(Accepted): 2012-04-12。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(40901240, 40971230, 50978052); 博士点基金(20093207110009)。[Jointly Sponsored by National Science Foundation (40901240, 40971230, 50978052) and Doctoral Program Foundation of Ministry of Education (20093207110009).]

作者简介(Biography): 卢华兴(1977-)男,博士,东南大学地理信息工程系讲师,主要研究兴趣为空间数据与空间分析不确定性、交通 GIS。[Lu Huaxing (1977-) male, Ph D, Lecturer of geoinformatics engineering faculty, Southeast Univ., his research interests include: uncertainty of spatial data and analysis, GIS applications for transportation.] E-mail: lhx@seu.edu.cn

杂度因子而言, 河网密度与等高线密度就具有较大的相关性, 在复杂度建模过程中不宜共存。

2. 易于局部计算: 全局指标反映整个区域的平均复杂度, 无法刻画局部地形的复杂程度, 如等高线密度和河网密度、平均坡度和平均坡向等等。而有些指标如局部分形维难于计算, 因此不适合做局部复杂度评价。

3. 因子的有效性: 地形复杂度因子在刻画地表时应该具备全面性, 如剖面曲率反映纵向剖面线的曲率大小, 平面曲率反映等高线的曲率, 而全曲率从纵向、平面、和对角线方向反映了地表的曲率大小, 因此全曲率比平面曲率或剖面曲率更有效。

综合考虑以上选择标准, 本文采用如下 4 种因子:

1. 局部高差 (Local Relief, LRE): 局部窗口的高程的最大值与最小值之差, 反映局部窗口地形起伏的程度;

2. 局部标准差 (Local Standard Deviation, LSD): 地形局部窗口高程的标准差, 反映局部窗口地形的平均起伏程度;

3. 局部褶皱度^[16-17] (Local Rugosity, LRU): 局部地形三维表面积与投影平面面积比, 反映局部窗口地形的平均褶皱程度;

4. 局部全曲率^[18 22] (Local Total Curvature, LTC): 刻画地表沿各个方向的平均曲率, 反映局部窗口地形的平均突变程度, 其表达式如下

$$c = (r^2 + 2s^2 + t^2)^{1/2} \quad (1)$$

式中 r 表示 x 方向二阶偏导数, t 表示 y 方向二阶偏导数, s 表示 x, y 方向偏导数

$$\left. \begin{aligned} r &= f_{xx} = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \\ t &= f_{yy} = \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \\ s &= f_{xy} = \frac{\partial^2 f}{\partial xy} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

1.2 局部窗口分析

格网 DEM 地形属性的局部计算通常采用移动窗口 (local moving window) 的数值方式, 计算值作为中心像元的属性值, 如图 1 所示, 1~9 分别代表 3×3 窗口的 9 个像元, g 表示像元的宽度, H 表示高程。

对于局部高差和局部标准差只需计算 9 像元的高差以及标准差计算较简单, 只需计算局部窗口全部像元的统计值即可, 这里主要探讨局部褶皱度和局部全曲率的计算方法。

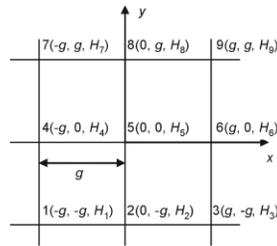


图 1 3×3 局部移动窗口

Fig. 1 3×3 local moving window

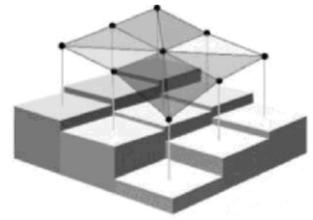


图 2 局部褶皱度

Fig. 2 Local rugosity

1. 局部褶皱度: 本文采用 Hobson 方法^[16-17], 如图 2 所示, 9 像元的中心点构成了 8 个三角形, 该三角形面积总和代表了 9 像元中心点构成区域的表面积 (A_s), 设水平投影面积为 A_p (4 个格网面积), 于是褶皱度为

$$T_{LRU} = A_s / A_p = A_s / 4g^2 \quad (3)$$

2. 局部全曲率: 由公式 2 可知, 计算局部全曲率关键是确定中心像元的二阶导数和偏导数, 在数字地形分析中, 格网 DEM 上的导数可以用数值差分方式近似估计^[22], 即

$$\left. \begin{aligned} f_x &= \frac{H_3 + H_6 + H_9 - H_1 - H_4 - H_7}{6g} \\ f_y &= \frac{H_7 + H_8 + H_9 - H_1 - H_2 - H_3}{6g} \\ f_{xx} &= \frac{H_1 + H_3 + H_4 + H_6 + H_7 + H_9 - 2(H_2 + H_5 + H_8)}{3g^2} \\ f_{yy} &= \frac{H_1 + H_2 + H_3 + H_7 + H_8 + H_9 - 2(H_4 + H_5 + H_6)}{3g^2} \\ f_{xy} &= f_{yx} = \frac{H_9 + H_1 - H_7 - H_3}{4g^2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 $H_1, H_2 \dots H_9$ 代表局部窗口的像元高度, 其角标编号与图 1 中像元编号对应。

1.3 多因子融合

确定了地形复杂度 4 个地形因子后, 考虑到不同地形因子的取值范围不一致 (如局部褶皱度 > 1 , 局部全曲率 < 1), 为了权衡不同因子的影响系数, 本文对各因子进行归一化处理, 即把因子计算值归算到 0~1 的数值范围, 计算方法如下

$$N = (T - \min T) / (\max T - \min T) \quad (5)$$

式中 $T, \min T, \max T$ 分别代表各因子的计算值、最小值和最大值。于是归一化后的 N 值取值范围为 0~1, 设局部高差、局部标准差、局部褶皱度以及局部全曲率的归一化值为 $N_{LRE}, N_{LSD}, N_{LRU}, N_{LTC}$ 。余下的问题是如何对 4 种因子进行融合, 是 4 种因子相乘

还是求和? 设 4 种因子的贡献度一致,对于相乘方式,CTCI 为单因子的 4 次方;而对于相加方式,CTCI 为单因子的线性函数,考虑到归一化后各种因子的值域范围为 0~1,CTCI 与单一因子的关系如图 3 所示。

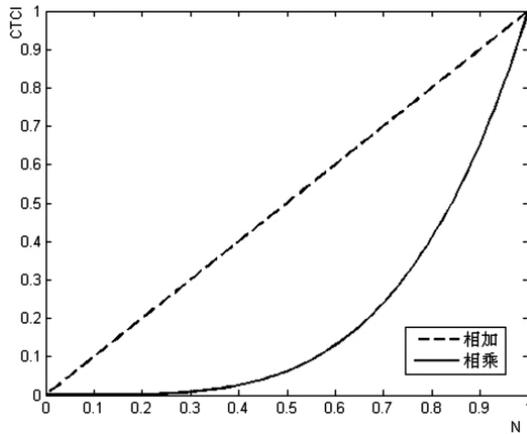


图 3 两种因子融合方式
Fig. 3 The fusion model of multivariable

由图 3 不难知道,相乘方式在总体上造成 CTCI 值压缩,不利于平衡各因子对 CTCI 的贡献,因此本文以平均值的方式对各地形因子融合,即 CTCI 等于 4 种地形因子和的平均值

$$C_T = (N_{LRE} + N_{LSV} + N_{LRU} + N_{LTC}) / 4 \quad (6)$$

2 实验分析

2.1 实验样区

实验选取了中国西北部陕西省黄土高原 3 个典型地貌区域(图 4),分别代表沟谷区(图 4a)、平原区(图 4b)、高山区(图 4c)。

2.2 实验分析流程

利用 VisualC++ 6.0 平台,我们设计了格网 DEM 的窗口分析程序,实验流程如图 4 所示,首先计算 3 个实验样区的地形复杂度因子,获得单因子地形复杂度数据 LRE 、 LSV 、 LRU 、 LTC ,并对地形因子做归一化处理得到 N_{LRE} 、 N_{LSV} 、 N_{LRU} 、 N_{LTC} (式 5),对归一化指标进行融合(式 6),得到复合指标 C_{LTC} 。通过对以上数据的统计分析,最后获得了每个 TCI 的统计值和 CTCI 的统计规律(图 5)。

2.3 实验结果

经过计算,获得了 3 个地区的地形复杂度数据(图 6),对结果数据的统计分析发现 3 种典型地貌区的复合地形因子的统计值差别较大,且按照平原区、沟谷区和高山区顺序排列,如表 2 所示,对 3 种典型样区的地形复杂度数据进行统计分析,比较区域统计值发现(加下划线数据),地形复杂度计算值从语义角度上反映了不同地貌类型的复杂程度,即高山区地形复杂度最高,沟谷区次之,平原区最低。

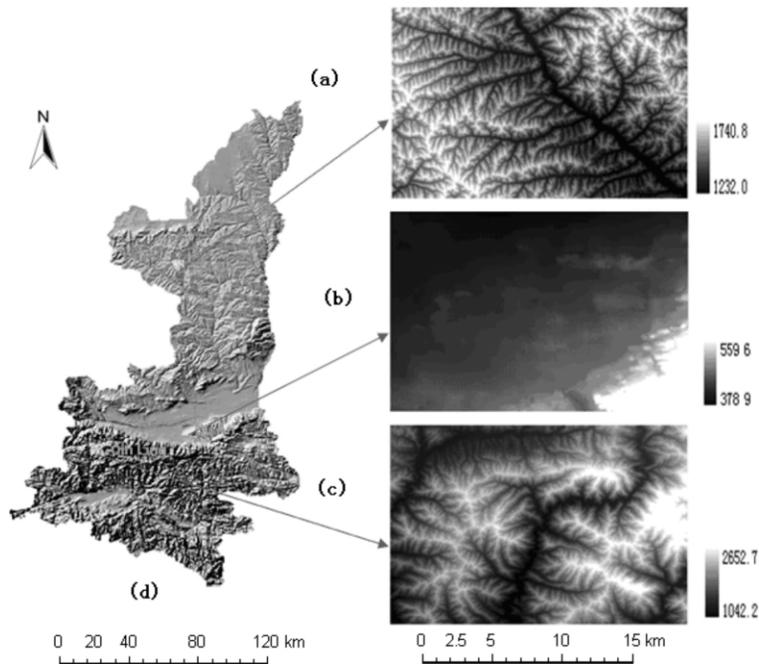


图 4 实验样区
Fig. 4 Test area

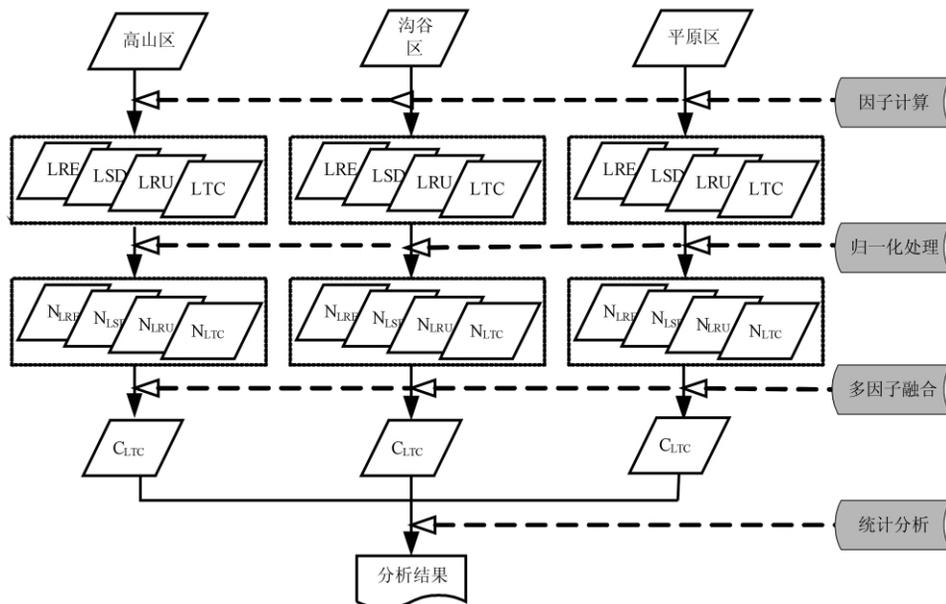


图 5 实验分析流程图

Fig. 5 Flow chart of data processing

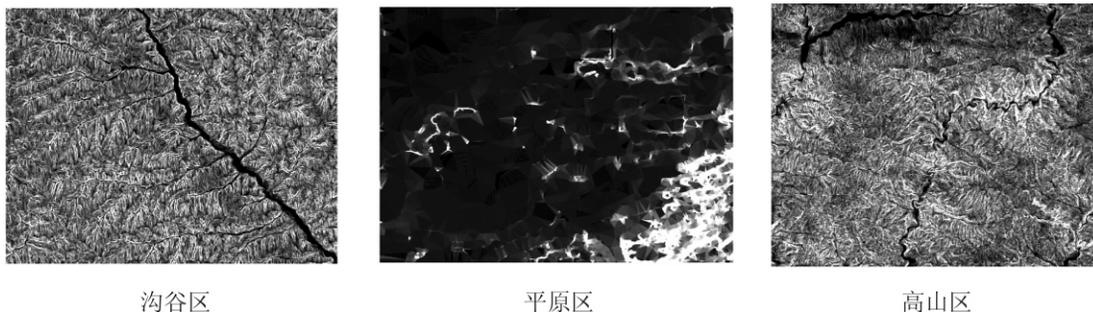


图 6 典型地貌区的地形复杂度

Fig. 6 Terrain complexity of typical test area

表 1 地形复杂度统计表

Table 1 Statistic table of terrain complexity

指标	平原区				高山区				沟谷区			
	Max	Min	Mean	St. d	Max	Min	Mean	St. d	Max	Min	Mean	St. d
LRU	1.083 949	1	1.005 267	0.005 017	2.503 333	1	1.232 323	0.134 085	1.948 476	1	1.124 266	0.082 245
LTC	0.024 886	0	0.000 181	0.000 417	0.117 671	0	0.013 202	0.008 533	0.064 25	0	0.011 144	0.007 2
LSD	7.908 564	0	0.187 605	0.320 762	45.647 62	0	13.754 78	4.899 303	32.266 43	0	9.590 529	3.812 486
LRE	21.099 98	0	0.564 413	0.986 082	146.100 00	0	42.814 02	15.424 77	100.500 00	0	29.392 71	11.633 41
C _{LTC}	0.113 561	0	0.002 409	0.004 194	0.788 611	0	0.216 059	0.078 247	0.588 669	0	0.147 977	0.056 732

2.4 模型验证

为了进一步验证模型的有效性,本文选择复合地貌区作为实验数据,提取该样区的地形复杂度数据,并与该样区对应的地形三维渲染图叠加,采用可视化对比分析方法(如图 7 所示,图 a 为混合地貌样

区,图(b)为该样区局部放大区域,背景图层为三维渲染图和等高线数据,前景图层为 CTCI 数据),经过对比分析发现,CTCI 与等高线的密度和变化程度有较好的吻合,表明能较好反映地表的起伏和褶皱程度。

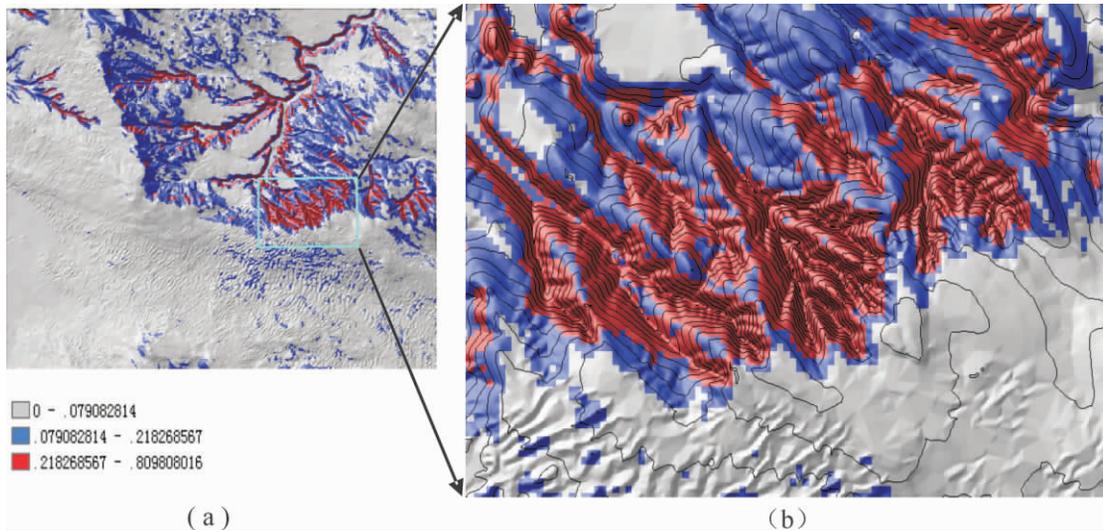


图7 复合复杂度指标与等高线对比

Fig. 7 Comparison between and CTCI and contour line

3 结语

本文对目前常见的地形复杂度单一指标进行了分析,并引入多因子局部窗口分析方法,选取了4类局部地形因子,建立复合地形复杂度指标(CTCI),实现对地表起伏和褶皱程度的描述。实验表明CTCI与等高线的复杂程度能较好地匹配,能较好地反应地表局部的地形复杂程度的变异情况。

鉴于目前与地形复杂程度相关的描述指标较多,要甄选出最佳的地形复杂度指标及其组合模型,需要对各种指标进行更详细分析测试,这将是本文进一步的研究工作。

参考文献(References)

- [1] Chou Y, Liu P, Dezzani R. Terrain complexity and reduction of topographic data [J]. *Journal of Geographical Systems*, 1999, 1(2): 179 - 198
- [2] Gao J. Impact of sampling intervals on the reliability of topographic variables mapped from Grid DEMs at a micro-scale [J]. *Geographical Information Science*, 1998, 12(8): 875 - 890
- [3] Cary, Geoffrey J, Keane et al. Comparison of the sensitivity of Landscape-fire-succession Models to variation in terrain, fuel pattern, climate and weather [J]. *Landscape Ecology*, 1997, 21(1): 121 - 137
- [4] Clément Fesquet. Impact of terrain heterogeneity on near-surface turbulence: long term investigation at Sirta observation [OL]. http://ams.confex.com/ams/BLTAgrBioA/techprogram/paper_1111039, 2006
- [5] Hara M, Hiraat K, Fujihaar M et al. Vegetation structure in relation to micro-landform in an evergreen broad-leaved forest on Amami Oshima Island [J]. *Southwest Japan Ecological Research*, 1996, 11: 325 - 337
- [6] Yang Yongchuan, Xu Liangjun. A brief review of studies on differentiation of vegetation pattern along a topographic gradient in hilly regions [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology* 2006, 30(3): 504 - 513 [杨永川, 达良俊. 丘陵地区地形梯度上植被格局的分异研究概述 [J]. *植物生态学报* 2006, 30(3): 504 - 513]
- [7] Bruce H. Carlisle. Modelling the spatial distribution of DEM error [J]. *Transactions in GIS* 2005, 9(4): 521 - 540
- [8] Byers J. Grid cell contour mapping of point densities: bark beetle attacks, fallen pine shoots, and infested trees [J]. *Oikos*, 1992, 63: 233 - 243
- [9] Fisher P. Improve modeling of elevation error with geostatistics [J]. *Geoinformatica*, 1998, 2: 215: 33
- [10] Hunter G, Goodchild M. Modeling the uncertainty of slope and aspect estimates derived from spatial database [J]. *Geographical Analysis*, 1997, 29: 35 - 49
- [11] Kyriakidis P, Shortridge A, Goodchild M. Geostatistics for conflation and accuracy assessment of digital elevation models [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 1999, 13: 677 - 707
- [12] Hsu Chiu-Ling. An indicator research of the terrain complexity—a classification of gully scale based on DEM [D]. Taipei: Taiwan University, 2002
- [13] Zhang Chao, Chen Bingxian, Wu Lun. Geographic Information System [M]. Beijing: High Education Press, 1999 [张超, 陈丙先, 鄂伦. 地理信息系统 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1999]
- [14] Li Zhilin and Zhu Qing. Digital Elevation Model [M]. Beijing: Science Press, 2003 [李志林, 朱庆. 数字高程模型 [M]. 北京: 科学出版社, 2003]
- [15] Gregory E, Rafael L. Hillslope processes, drainage density, and landscape morphology [J]. *Water Resources Research*, 1998, 34

- (10): 2751 – 2764
- [16] Hobson R. FORTRAN IV programs to determine the surface roughness in topography for the CDC 3400 computer [J]. *Computer Contribution State Geol. Survey Kansas* ,1967 ,14: 1 – 28
- [17] Hobson R. Surface roughness in topography: quantitative approach [C]//Chorley ,R J ,editor. *Spatial analysis in geomorphology* , 1972: 25 – 245
- [18] Shary P ,Sharaya L ,Mitusov A V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis [J]. *Geoderma* 2002 ,107: 1 – 32
- [19] Zhou Tong ,Long Yi. A fraetal method to describe the terrain complexity reflected by the raster DEM [J]. *Geography and Geo-Information Science* 2006 22(1) : 26 – 30 [周侗 ,龙毅. 格网 DEM 地形复杂度的分形描述方法 [J]. *地理与地理信息科学* 2006 22 (1) : 26 – 30]
- [20] Tang G. A research on the accuracy of DEMs [M]. Beijing – New York: Science Press 2000
- [21] Jie Shan ,Muhammad Zaheer and Ejaz Hussain. Study on accuracy of 1 – degree DEM versus topographic complexity using GIS zonal analysis [J]. *Journal of Surveying Engineering* 2000 ,129(2) : 85 – 89
- [22] hou Qiming ,Liu Xuejun. Digital terrain analysis [M]. Beijing: Science Press 2006 [周启鸣 ,刘学军. 数字地形分析 [M]. 北京: 科学出版社 2006]

Terrain Complexity Assessment Based on Multivariate Analysis

LU Huaxing¹ ,LIU Xuejun² ,TANG Guoan¹

(1. *School of Transportation. Southeast University Nanjing 210096 ,China;*

2. *School of Geographic Science. Nanjing Normal University Nanjing 210097 ,China)*

Abstract: Terrain complexity ,which describes rugousness and complexity of the terrain surface ,is not only an important terrain parameter in digital terrain analysis ,but also widely applied in the fields of reduction of topographic data and DEM modeling ,terrain classification and DEM accuracy modeling and assessment. Unfortunately ,terrain complexity is an ambiguous terrain feature that tills now no optimal index to quantify it. The traditional terrain complexity indices evaluate terrain complexity only from one perspective of geomorphometry or just give a statistical value (global value) ,which will cause more or less prejudice when modeling the real landform. This paper wants to seek a local compound terrain complexity index to quantitatively evaluate topographic complexity based on grid DEM. According to multivariate analysis method ,we firstly selected 4 different traditional indices that can easily be evaluated by local kernel window ,then deduce the compound terrain complexity index (CTCI) using indices fusion. In order to validate model ,we selecte 4 study areas with 3 typical landform and 1 hybrid landform ,then compute the CTCI of each test areas and compare the CTCIs with contour lines and DEM hill shade map ,the result shows the CTCI can roughly differentiate the contour line where is cliff and dense and where is smooth and sparse , which indicates CTCI is a sound terrain parameter to evaluate terrain complexity.

Key words: DEM; terrain complexity; multivariate analysis