

黄土小流域不同发育阶段地形指数变异特征分析

刘敏^{1,2}, 汤国安², 王春², 崔灵周³

(1. 西北大学 城市与资源学系, 陕西 西安 710069; 2. 南京师范大学 虚拟地理环境教育部重点实验室 江苏 南京 210097; 3. 温州大学 生命与环境科学学院, 浙江 温州 325035)

摘要: 基于人工降雨实验获取的黄土模拟小流域高解析度 DEM 数据, 提取其不同发育阶段的地形指数, 分析了黄土小流域降雨侵蚀过程中地形指数的空间分异特征、平均地形指数变化规律及地形指数频率分布曲线特征。研究证明, 地形指数空间分布与地形呈现很强的相关性, 地形指数均值与坡度均值呈现对数变化关系, 地形指数频率分布图随地形变化呈现规律性变化。地形指数空间变异特征分析可为研究流域地形和流域水文相似性提供基础资料。

关键词: GIS; DEM; 地形指数; 小流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2007)02-0056-05

中图分类号: P208, S157.1

Analysis of Topographic Index Variance Based on a Small Tested Loess Watershed in Different Evolution Periods

LIU Min^{1,2}, TANG Guo-an², WANG Chun², CUI Ling-zhou³

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

2. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Nanjing Normal University, Ministry of Education, Nanjing, Jiangsu 210097, China; 3. Life and Environment Science College, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China)

Abstract: As a physical index to express the information on topography, topographic index is a very important parameter for many physically based hydrological models. This article analyzes the topographic index based on a small tested loess watershed. The topographic index is derived from DEMs of the watershed by using the single flow direction method. Results show that the spatial distribution of the topographic index has a high correlation with terrain distribution. Average topographic index variance has an exponential relationship with average slope variance. Frequency distribution of the topographic index shows a regular change with changed topography. The analysis of the topographic index variance can help us study catchment topography and hydrological similarity.

Keywords: GIS; DEM; topographic index; small watershed

地形指数 $\ln(\frac{a}{\tan \alpha})$ (其中 a 表示单位等高线长度的汇水面积, $\tan \alpha$ 为该处的坡度) 反映了径流在流域中任一点的累积趋势 (以 $\ln(\frac{a}{\tan \alpha})$ 表示) 以及重力使径流顺坡移动的趋势 (以 $\tan \alpha$ 表示)^[1], 是很多以物理概念为基础的水文模型的重要组成部分, 能够反映土壤水分、地表产流面积和产流过程的空间分布特征^[2]。它实际上可以认为是一种对径流路径长度、产流面积等的定量描述, 因而也是对流域中各点潜在 (理论) 土壤水分含量和径流产生潜在能力的量化。地形指数愈大, 意味着要么该区域具有更大的坡面汇流面积, 要么就是具有较低的水力坡降 ($\tan \alpha$), 则该区具有更大潜力的饱和带发展, 土壤愈容易达到饱和而产生流。因此, 只要给定一个合适的 DEM, 就可根据数字地面分析计算出分布式的地形指数, 从而可计算

流域土壤相对含水量和地下水位, 描述土壤含水量空间分布状况, 模拟径流的扩散方向, 这对于地面信息不充分的流域尤其具有应用价值^[3-4]。但是, 在地貌发育过程中地形指数是怎样的变化特征, 由于原始资料'的不足, 相关的研究非常欠缺。本文以一组特殊的小流域地貌模拟数据为数据源, 提取地形指数, 进而分析地形指数的空间分异特征、平均地形指数变异规律、地形指数频率分布特征。

1 实验过程概述

模拟试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室的模拟降雨侵蚀试验大厅下喷式雨区完成。试验从 2001 年 2 月中旬开始, 于 2001 年 12 月中旬结束, 历时 10 个月。此过程中, 运用近景数字摄

影测量方法,相邻 2 次拍摄间隔时间为一个星期左右,降雨为 2~5 场,共拍摄 9 次,分别获得 9 个时段经人工降雨侵蚀后黄土坡面高解析度 DEM 数据。基于 DEM 数据,在 ARCGIS 软件平台上生成模拟坡

面不同发育时期地貌形态的空间立体模型(图 1),这些影像清晰地再现了模拟坡面在降雨作用下,由初始的缓坡状态,发育为地形破碎、沟壑纵横的侵蚀地貌景观的渐进演化过程。

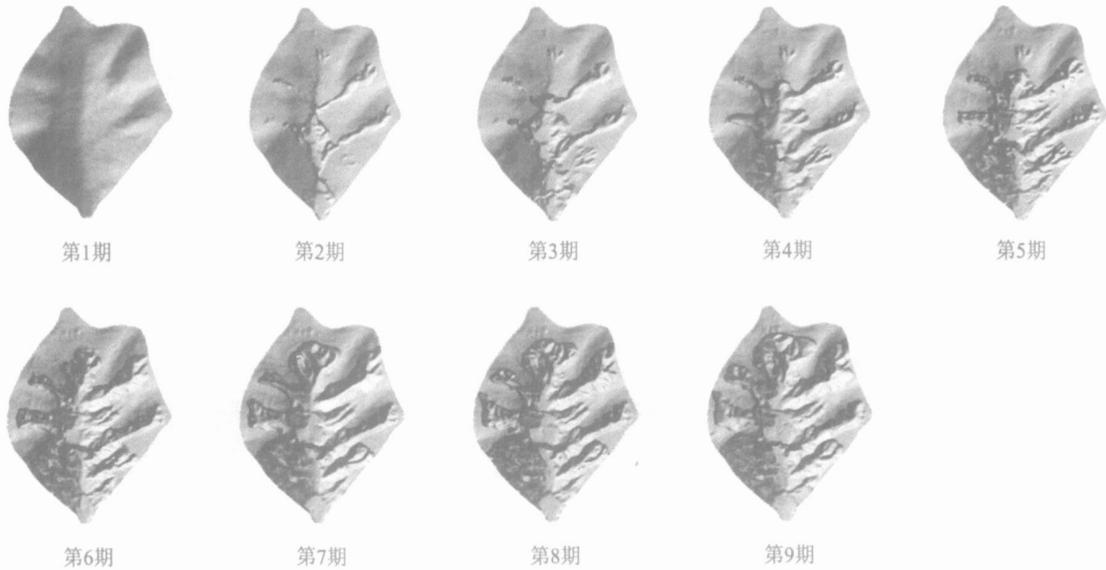


图 1 模拟坡面 1—9 期 DEM 光照晕渲图

2 地形指数提取

基于数字高程模型 DEM 的地形指数提取方法有多种,其中主要的提取方法有:D8 方法(单流向法, single flow direction, SFD), Rho8 方法,多流向法(multiple flow direction, MFD), Aspectdrive 方法, DEMON 方法和 ERS 方法等。其中,D8 方法和多流向法应用较为普遍^[5]。D8 算法是 1984 年由 O' Callaghan 和 Mark 提出的,径流仅流向周围 8 个邻域中最陡的单元^[6]。

但是,在实际情况之中,由于地形状况的复杂性,水流并不总是只朝着某一个方向流动,因此,1991 年 Quinn 先生等提出了相对于单流向算法的多流向算法。多流向算法与单流向法最大的区别就是将水流按照坡度的比例从较高的单元分配至周围相邻较低的单元上^[1]。

但现行的多流向法还存在一些问题^[7],D8 算法相对已比较成熟,且简单易行,因此,本次实验中采用 D8 单流向算法来进行地形指数的提取。

根据地形指数的计算公式 $\ln(A/\tan\theta)$,需要首先计算单位等高线长的上坡汇流面积 A 和局部坡度 $\tan\theta$,再对其取自然对数,得到地形指数。主要计算公式如下^[5]:

$$A = (n + 1) D_x^2 \quad (1)$$

式中: A ——格网单元的上坡汇流面积,它不仅包括对计算单元有水流累积贡献的单元面积,还包括欲计算网格的面积; $(n + 1)$ ——单元格网总数,其中 n 表示对计算单元有水流贡献的格网单元个数,1 表示欲计算的单元; D_x ——DEM 栅格单元边长。

$$= A/C, C = \begin{cases} D_x & \text{主方向} \\ \sqrt{2} D_x & \text{对角方向} \end{cases} \quad (2)$$

式中: C ——单位等高线的上坡汇流面积,如果最陡坡向在主方向上则取等高线为 D_x ,如果最陡坡向在对角方向,则取等高线为 $\sqrt{2} D_x$ 。

最陡坡度的计算公式为:

$$\tan\theta = H/L \quad (3)$$

式中: H ——欲计算单元格与其最陡坡向上单元格处的高程差。 L ——质心距离。主方向上取 D_x ,对角方向取 $\sqrt{2} D_x$ 。

计算过程中,在相邻栅格间高程相等的地方,栅格间高差设定为 0.5^* (高程垂直分辨率)。本文地形指数的提取是在 ArcInfo Workstation 中通过编写 AML 程序实现。

3 实验结果分析

3.1 地形指数空间分异

图 2 所示为 9 期小流域模拟数据提取的地形指数计算结果分布图。

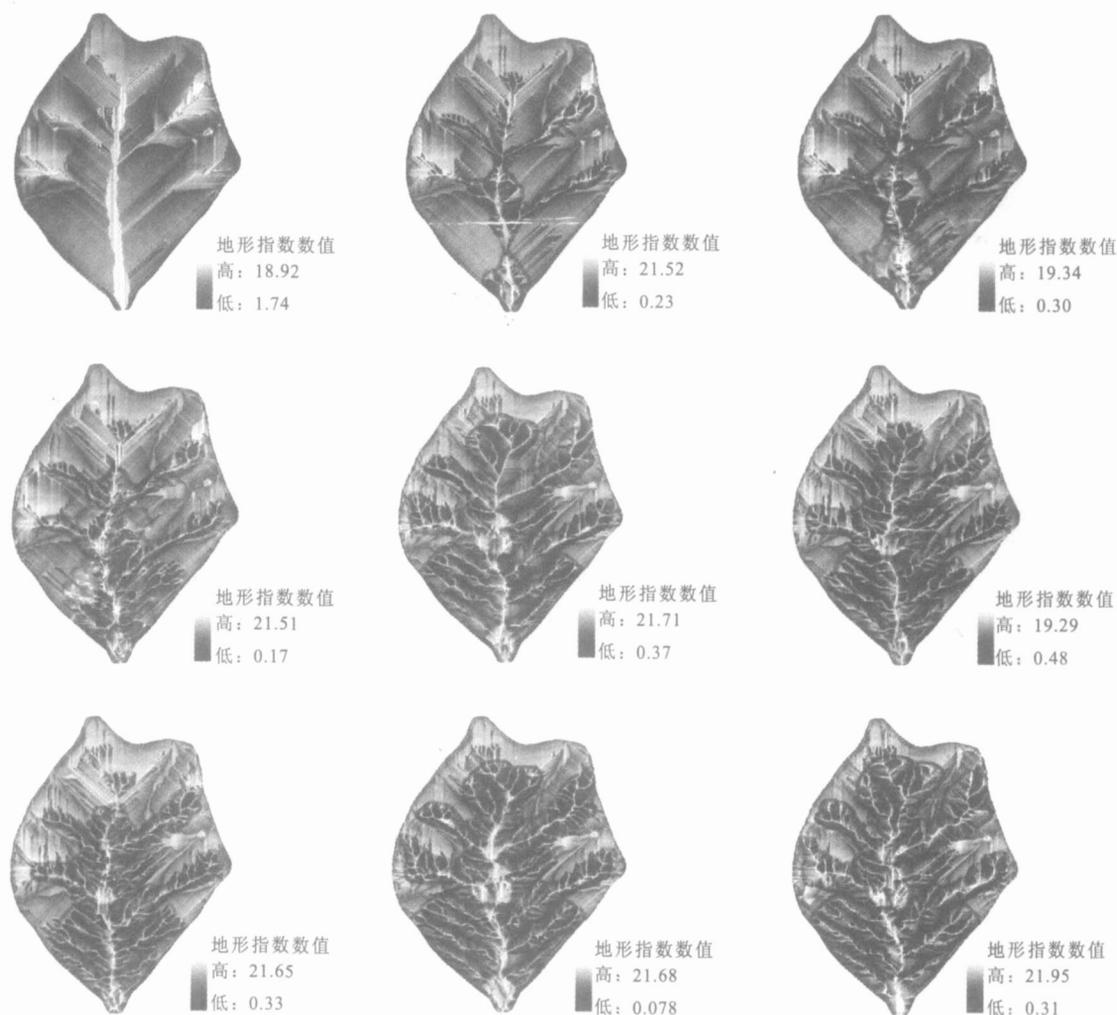


图 2 1—9 期 DEM 提取地形指数图

所得 9 期数据地形指数的空间分异与相对应 9 期数据地形空间分异表现出极强的相关性。分别对照各期小流域 DEM 与各期地形指数空间分布图,地形沟沿线与地形指数突变边缘很好地吻合。分析原因,侵蚀边缘地区汇流累积变化不大,但坡度出现突变,因此地形指数数值也出现突变。图中反应出的另一个现象为:地形指数的最大值(即图幅中颜色最浅处)构成了河网状的细线条分布,并且此线条形态与对应每期河网分布非常相似。从第 1 期到第 9 期明显的反应出河谷从主沟发育,再逐步发育出支沟的沟谷发育过程。这是由于沟谷部分汇流累积量大,而坡度变化小,从而得到的地形指数值最大。

3.2 地形指数均值图

图 3 为基于 9 期模拟数据提取的地形指数均值柱状图,柱状图反映了 9 期数据地形指数均值的变化。模拟流域地形指数均值从整体上呈现递减趋势。地貌发育幼年期(第 1—5 期),地形指数均值呈加速递减趋势,尤其是第 1 期到第 2 期,第 4 期到第 5 期,

出现 2 个较大幅减小;地貌发育壮年期(第 6—9 期)地形指数均值递减趋势减小,并趋于稳定,最后一期地形指数均值较第 8 期有极其微弱的增加。这样的变化趋势与平均坡度变化趋势极其相关。王春等在基于小流域的坡度分析中^[8],对 9 期模拟小流域数据的平均坡度变化做了相应的分析,结合坡度均值,发现坡度均值变化与地形指数均值变化呈现完全相反的变化趋势。图 4 为 9 期模拟数据地形指数均值与坡度均值散点图,它很好地体现出地形指数均值与坡度均值的对数关系。地形指数计算公式中另一个因子的变化对地形指数的影响通过图 5 得以反映,图 5 是 9 期数据单位等高线汇水面积的累积频数,图中 9 期数据曲线非常接近,说明在此小流域地貌发育过程中单位等高线汇水面积数值变化并不明显,这更说明了此小流域发育过程中地形指数均值的变化主要受影响于坡度均值的变化。结合公式(4),地形指数(topographic index, 这里简称为 T_i) 计算公式的全微分方程,由于 9 期小流域数据 变化不大,所以 d

数值较小,而通过对 9 期数据进行统计可以得到 90% 以上的单位等高线汇水面积都大于 100 m⁻¹, 在此也起比较小的影响作用,因此,相比之下 9 期数据中坡度的变化对地形指数数值有更大的改变。这也很好地说明了图 6 所反映出的地形指数均值与坡度均值极强的对数关系。

$$d T_l = d f + d f = -1 d - 2 \csc 2 d \quad (4)$$

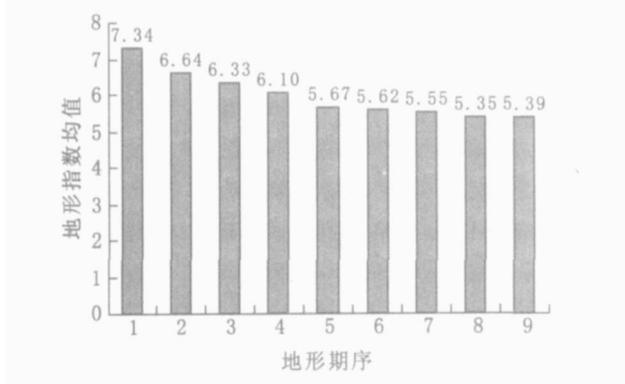


图 3 9 期数据地形指数均值图

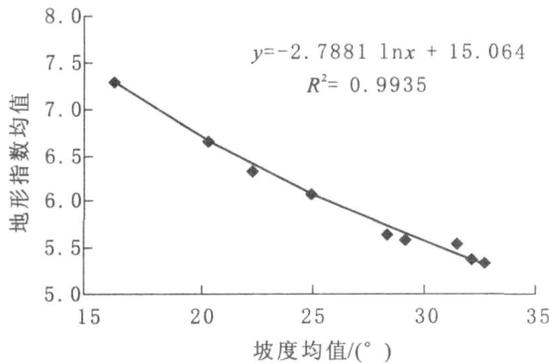


图 4 地形指数均值与坡度均值散点图

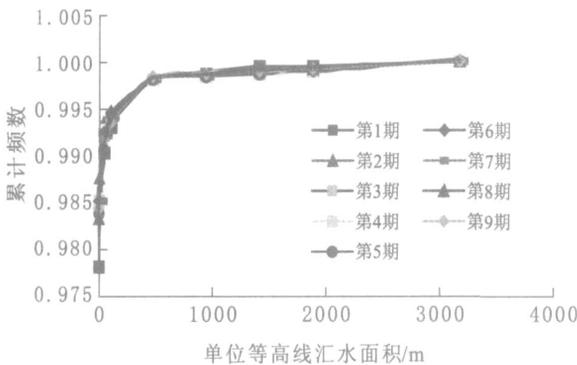


图 5 单位等高线汇水面积累积频率图

从以上的分析可以得出,在此小流域发育过程中,随着降雨侵蚀的进行,单位等高线汇水面积变化不大,地形指数值的变化主要受影响于坡度值的变化。这样的结果为我们进行流域地貌分析,流域水文相似性分析提供参考,这样的规律是否可以推广到其它流域的发育过程,有待更进一步的研究。

3.3 地形指数频率分布图

图 6 为基于 9 期模拟数据提取的地形指数频率分布图。

地形指数频率曲线从第 1 期到第 9 期以数值 6 为轴点呈持续的逆转变化的(图 6)。其中,第 1 期到第 4 期,曲线峰值突出出现在 6~9 范围,4 期以后,峰值左移,出现在 3~6 范围。分析认为此规律是符合实际情况的。随着土壤侵蚀的加剧,坡面越来越破碎,坡度增大,汇水面积被分散,因此地形指数大值有减小的趋势,峰值左移。结合图 2,从地形指数的空间分异图也可以看出地貌从幼年期逐渐发展到壮年期的过程中,图中深色部分面积增大,地形指数小值部分逐渐占到越来越大的比例。频率分布图反映出地形指数的频率分布随地形的逐步侵蚀呈现很好的规律性变化。

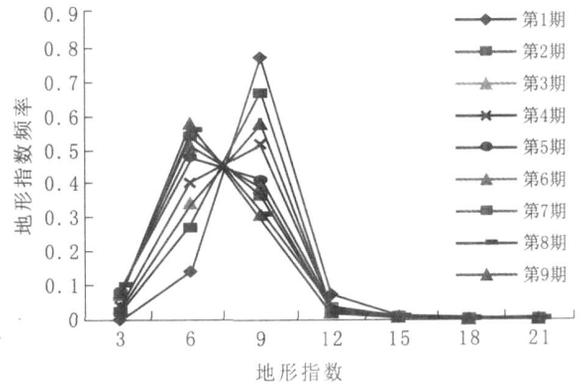


图 6 9 期数据地形指数频率分布图

4 结论

(1) 多项研究显示,本次模拟实验是比较成功的^[9-13],模拟实验很好地再现了降雨过程黄土坡面的侵蚀发育进程,包括其整体与肢体的细节变化。以此数据进行地形指数研究,能够很好地反映地形指数随地貌发育的空间分异特征。研究发现,地形指数的空间分异与原地形呈现出极强的空间相关性;地形指数均值随降雨侵蚀的推进呈递减变化,变化趋势与平均坡度的变化趋势呈指数相关。

(2) 地形指数的频率分布是利用微观地形指标来反映宏观地形特征的有效方法。9 期地形指数频率分布曲线呈现出很好的持续逆转变化的,这一特征一方面反映了地形指数随流域地形发育而变化的趋势,另一方面,也反映了黄土地貌形态的空间变异特征,是黄土地貌侵蚀规律的反映。地形指数空间变异特征分析可为研究流域地形和流域水文相似性提供基础资料。

[参 考 文 献]

- [1] Quinn P F, Beven K J, Chevallier P, et al. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models[J]. *Hydrological Processes*, 1991(5):59—79.
- [2] Zhang W, Montgomery D R. Digital elevation model grid size, Landscape representation, and hydrological simulation[J]. *Water Resources Research*, 1994,30(4):1019—1028.
- [3] Wolock D M. Simulating the variable-source-area concept of streamflow generation with the watershed model TOPMODEL[R]. U S Geol Surv Water Resour Invest Rep, 1993. 93—4124.
- [4] Robson A J, Whitehead P G, Johnson R C. An application of a physically based semi-distributed model to the Balquhider catchments[J]. *J Hydrol*, 1993,145:357—370.
- [5] 张镀光,王克林,陈洪松,等. 基于 DEM 的地形指数提取方法及应用[J]. *长江流域资源与环境*,2005,14(6):715—719.
- [6] O'Callaghan J F, Mark D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data[J]. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1984,28:323—344.
- [7] 孔凡哲,芮孝芳. TOPMODEL 中地形指数计算方法的探讨[J]. *水科学研究进展*,2003,14(1):41—45.
- [8] 王春,汤国安,张亭,等. 黄土模拟小流域降雨侵蚀中地面坡度的空间分异[J]. *地理科学*,2005,25(6):683—689.
- [9] 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:西北农林科技大学,2002.
- [10] 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.
- [11] 孔凡哲,芮孝芳. 基于地形特征的流域水文相似性[J]. *地理研究*,2003,22(6):709—715.
- [12] BEVEN K, KIRKBY M J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology[J]. *Hydrological Science Bulletin*,1979,24(1):43—69.
- [13] Quinn P, Beven K J, Lamb R. The index: how to calculate it and how to use it in the TOPMODEL framework[J]. *Hydro Process*, 1994,9:161—185.
- [6] (上接第 28 页)
- [6] Giollaro, N Romano. Spatial variability of the hydraulic properties of a volcanic soil[J]. *Geoderma*, 1995,65(3):263—282.
- [7] 裘善文,张柏,王志春. 中国东北平原西部荒漠化现状、成因及其治理途径研究[J]. *第四纪研究*,2005,25(1):63—73.
- [8] 杨诗秀,段新杰. 田间测定土壤水分参数的研究 - 圭尔夫渗透仪的应用[J]. *灌溉排水*,1991,10(2):43—47.
- [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] 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):103—110.
- [11] 任立良,刘新仁. 基于 DEM 的水文物理过程模拟[J]. *地理研究*,2000,19(4):369—376.
- [12] 张朝生,章申,何建邦. 长江水系沉积物重金属含量空间分布特征研究——地统计方法[J]. *地理学报*,1997,52(2):184—192.
- [13] 赵斌,蔡庆华. 地统计学分析方法在水生态系统研究中的应用[J]. *水生生物学报*,2000,24(5):514—520.
- [14] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京:科学出版社,1999. 60—101.
- [15] 蔡树英,杨金忠,伍靖伟. 土壤渗透参数空间变异性的试验研究[J]. *中国农村水利水电*,2002(11):13—17.
- [16] Soil moisture equipment corp. 2800 KIGuelph permeameter operating instructions, Santa Barbara, CA93105, U. S. A. 1991.
- [17] 单秀枝,魏由庆,刘继芳,等. 土壤有机质含量对土壤水动力学参数的影响[J]. *土壤学报*,1998,35(1):1—9.