

文章编号:1001-4810(2009)02-0175-06

基于地形因子特征值的喀斯特流域地貌类型判别^①

薛显武, 陈 喜, 张志才, 秦年秀

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘 要:利用数字地面高程模型进行子流域划分,提取反映喀斯特地貌形态的7个地形因子——高程、坡度、地形起伏度、地形粗糙度、地表切割深度、高程变异系数和地形指数,提出根据地形因子特征值进行喀斯特地貌类型判别方法。以贵州省后寨河流域为例,在划分的18个流域中,选取16个流域通过单个地形因子特征值相关分析和多个地形因子特征值模糊聚类分析,确定峰丛—洼地和峰林—盆地地貌类型判别的阈值,选取另外两个流域进行判别方法检验。结果表明:基于地形因子特征值可定量判别出喀斯特流域不同地貌类型。

关键词:地形因子特征值;面积—地形因子曲线;喀斯特地貌类型;后寨河流域

中图分类号:P931.5

文献标识码:A

0 引言

喀斯特地貌地形复杂,具有独特的地理景观,喀斯特流域地貌发育影响因素很多,如,地貌成因类型、地表切割程度、流域高程变化程度、流域水系结构特征以及流域坡度变化等,导致喀斯特地貌复杂多样,地貌类型识别比较困难^[1]。目前,在喀斯特领域中,对喀斯特形态(地貌)类型划分,尚无统一的定量标准^[2]。随着地理信息系统(GIS)的出现,人们可以借助于其强大的空间分析功能分析地貌学研究中的问题,且GIS分析方法操作方便、结果可靠^[3]。国外学者使用基于GIS的数字地貌形态技术对盆地喀斯特进行了研究^[4],国内也有类似研究成果^[1~3, 5~11]。如张兆干等人以1:1万的地形图为底图,结合野外调查和航片资料,采用聚类分析对地貌类型进行定量划分^[10];贺中华等人根据贵州省ASTER影像,利用RS和GIS技术提取数字地面高程模型(DEM)数据,提出了喀斯特流域7种地貌类型识别模型,并通过方差分析和样区检验,识别效果较好^[1]。

本文以普定后寨河流域为例,利用ArcGIS及DEM提取18个流域的7个地形因子:高程、五个坡面

因子(包括坡度、地形起伏度、地表切割深度、地形粗糙度和高程变异系数)以及地形指数,提出了地形因子特征值分析法,即通过面积—地形因子曲线得出地形因子特征值,对其中的16个流域地形因子特征值进行单因子统计分析和多因子聚类分析,以确定地貌类型判别的阈值。选取两个喀斯特流域进行检验,探索喀斯特地区地貌类型定量判别方法的可靠性。

1 研究区概况

研究区地势东南高、西北低。由于区内碳酸盐岩层广泛分布,岩溶地貌发育,峰林耸立,洼地、盆地分布广泛,地势平缓开阔(如图1)。海拔一般为1 225~1 565 m。受控于岩性、地质构造和新构造运动,流域内地貌结构复杂,主要地貌结构有峰丛—洼地和峰林—盆地两种地貌类型。

峰丛—洼地类型,主要分布在本流域的东部和东北部,是后寨地下河系源头区。峰丛顶面高程在1 400~1 565 m之间,坡面坡度为50°~60°。峰丛表面溶沟、溶槽发育,还常常发育溶洞,峰丛之间常常是洼地,洼地海拔高度约1 360 m,正负地形相对高差小于

① 基金项目:国家重点基础研究(973)项目(2006CB403200)、教育部科学技术研究重大项目(308012)及国家自然科学基金项目(50679025)

第一作者简介:薛显武(1981—),男,博士研究生,主要从事流域水文模拟、地下水数值模拟研究。E-mail: xuexianwu@hhu.edu.cn

收稿日期:2008-11-25

100 m。洼地内蚀余堆积少,土层薄并常有落水洞、漏斗发育,基岩大面积裸露。由于有大量的溶蚀裂隙存在,当大气降雨时,水流被溶隙迅速吸收转入地下,地下水埋深较大,常达10~30 m^[12]。

峰林—盆地类型,主要分布在本流域的西部和西北部,盆地四周被峰林所环绕(图1),盆地高程在1 220~1 260 m之间,由几个大型溶蚀洼地合并而成,其间

有明暗相间河流串联。盆地边缘为峰林,盆地内土层较厚,地面较平坦。洼地、漏斗、地下河天窗、落水洞等星罗棋布。此外,尚有台地发育,大多数台地上覆盖黄土,比如黄土坡、干坝就属此类^[12]。本文通过ArcGIS将1:1万的等值线图转化成网格大小为5 m的DEM地图,然后根据实际水系,利用ArcHydro Tools工具进行流域划分,共分为18个流域(图1)。

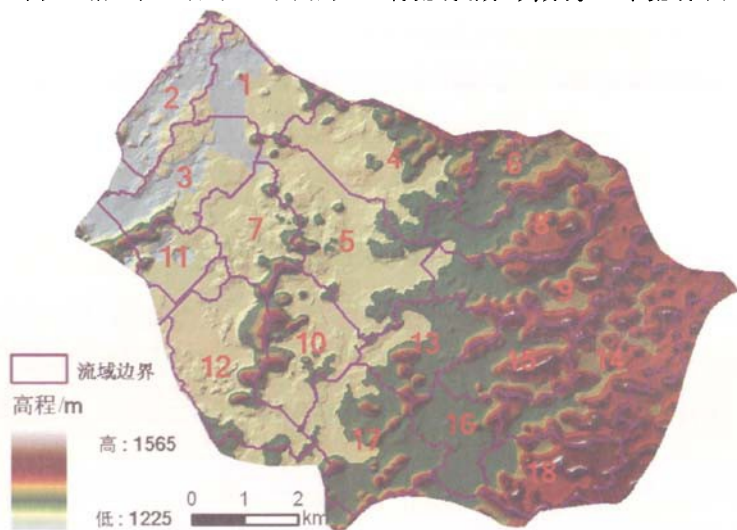


图1 流域高程及流域划分

Fig. 1 Distribution of basin elevation and basin division

2 地形因子提取及分类识别方法

2.1 地形因子提取

地貌是地形在不同发育阶段的表现形式,地形定量因子是为有效地研究与表达地貌形态特征所设定的具有一定意义的参数或指标^[13]。地面数字高程模型(DEM)广泛应用于流域划分、水系生成及地貌类型判别。基于DEM可以生成出栅格单元坡度、坡面因子及控制山丘区流域产汇流过程的地形指数等。

在喀斯特地貌中,不论是峰林—盆地,还是峰林—洼地,都有其独特的坡面组成,地貌的变化其实就是坡面的变化。坡面变化可以通过坡面因子衡量,包括坡度、地形起伏度、地表切割深度、地形粗糙度和高程变异系数。

坡度是指局部地表表面在空间的倾斜程度,坡度的大小直接影响着地表物质流动与能量转换的规模与强度,是制约生产力空间布局的重要因子。

地形起伏度是指在指定的分析区域内所有栅格中最大高程与最小高程的差值,是反映地形起伏的宏观地形因子。在区域性研究中,利用DEM数据提取

地形起伏度能够直观地反映地形起伏特征。

地形粗糙度是反映地表的起伏变化和侵蚀程度的指标,一般定义为地表单元的曲面面积与其在水平面上的投影面积之比,是衡量地表侵蚀程度的重要量化指标。

地表切割深度是指地面某点邻域范围的平均高程与该邻域范围内的最小高程的差值,其值直观地反映了地表被侵蚀切割的情况,并对这一地学现象进行了量化,是研究水土流失及地表侵蚀发育状况的重要参考指标。

高程变异系数是以格网单元顶点的标准差与平均高程的比值来表示,反映了分析区域内地表单元格网各顶点高程的变化情况。

另外,地形指数,也称地形湿度指数,其定义为 $\ln(\alpha/\tan\beta)$,其中: $\tan\beta$ 为地表坡度, α 为单宽集水面积^[14]。地形指数是很多山丘区分布式水文模型建模的控制性指标,它控制了土壤水、土壤饱和度以及径流形成过程的空间分布。

本文将高程、坡度、地形起伏度、地表切割深度、地形粗糙度、高程变异系数和地形指数统称为地形因

子。

2.2 面积—地形因子曲线

流域整体的形态特征可用面积—地形因子曲线加以表述。面积—地形因子曲线是表示相对地形因子值和相对面积之间的关系曲线(图2)。图2中,纵坐标表示相对地形因子值,其计算公式为:

$$y = \frac{t - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (1)$$

式中: t 表示地形因子值, $T_{\min}$ 和 $T_{\max}$ 分别表示整个流域地形因子的最小值和最大值。

相对面积指高出地形因子值 t 的水平断面面积与流域总面积之比,可用地形因子等值线所切的水平断面面积与流域总面积之比求得。由于该曲线是通过

无因次参数建立的,所以可以对不同大小的流域进行形态对比。

按照图2(a)分别提取18个流域的面积—地形因子曲线(如图2(b)~(h))。从图2可以看出:(1)各流域的整体形态特征存在差异;(2)总体来看,在地形变化大的峰丛—洼地,相对地形因子值(除地形指数外)平均值所占面积比例(图2(b)~(h)中实线)大于地形变化缓的峰林—盆地(图2(b)~(h)中虚线)所占面积比例;(3)从地貌类型识别来看,除了面积—坡度曲线(图2(b))较为明显地分为两组曲线外,其它面积—地形因子曲线都难以进行定量分类。这个现象表明,反映地表物质流动与能量转换规模与强度的坡度统计特征是地貌分类的关键。

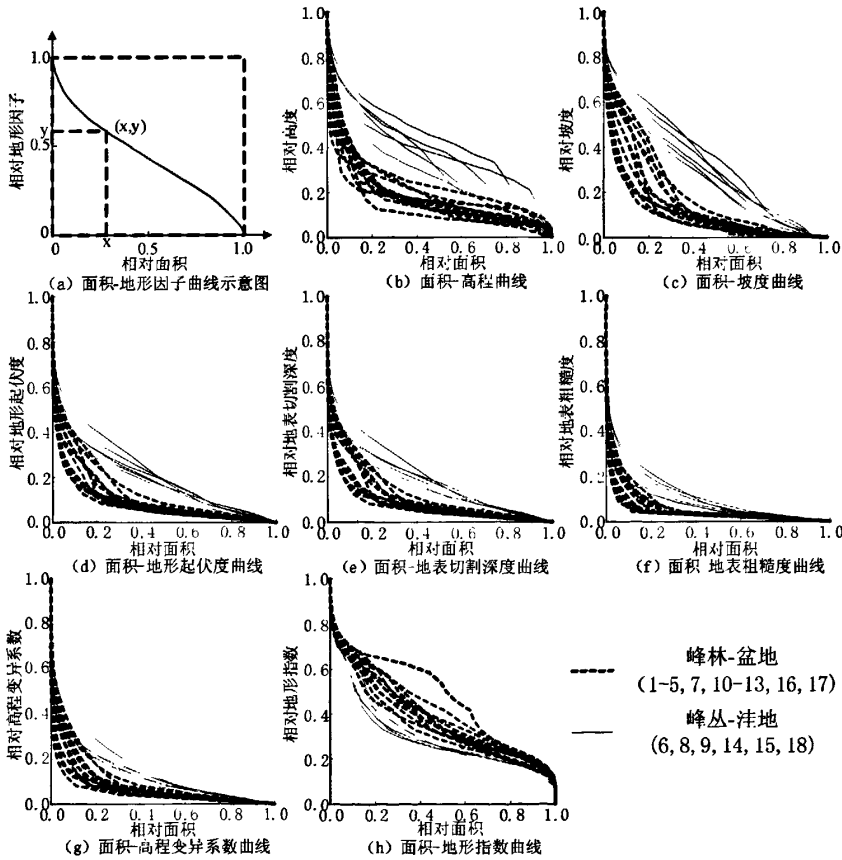


图2 流域面积—地形因子曲线
Fig. 2 Area-landform factor curves of basins

3 流域地形因子特征值相关性分析及聚类分析

为了便于面积—地形因子曲线的定量分析,本文进一步提出了地形因子特征值概念,即地形因子曲线与X轴和Y轴所围成的图形面积。根据各流域地形因

子特征值的相关性分析或聚类分析,可以定量判别流域地貌类型。

本文利用18个流域中16个流域地形因子特征值进行相关分析及聚类分析,以确定地貌类型,利用剩余2个流域地形因子特征值进行识别方法验证。

3.1 单因子相关分析

将16个流域地形因子特征值按从小到大排列,分别绘制高程、坡度、地形起伏度、地表切割深度、地形粗糙度、高程变异系数和地形指数的地形因子特征值相关图(图3),图中Y轴是各地形因子特征值,X轴是流域排列次序。

为了定量判别喀斯特流域的地貌类型,本文根据位于两直线上相距最近的流域地形因子特征值的距离(定义为敏感区大小)作为地貌类型差异性的定量表述。计算的16个流域地形因子特征值相关性敏感区大小见图3。

本文取敏感区的中心点所对应的地形因子特征值为阈值(图3),作为区分峰丛—洼地和峰林—盆地组合类型之间的界线。除了地形指数特征值外,其它

地形因子特征值大于该阈值的流域地貌为峰丛—洼地组合类型,小于此值的流域地貌为峰林—盆地组合类型。除地形指数特征值外,其它地形因子特征值由西北向东南逐渐减小。地形指数反映流域任一点径流受重力作用下顺坡移动的累积趋势^[15],与其它反映沿地形法线方向能量变化的地形因子呈反比关系。以坡度为例,地形指数随坡度的减小而增加,这种变化和该地区地势东南高、西北低的空间变化相吻合。由图3可以看出峰林—盆地类型包含11个流域,位于后寨河流域西部;峰丛—洼地组合类型包含5个流域,位于该流域东部(图1)。此外,图3中坡度特征值的敏感区最大,说明坡度特征值最为敏感,利用它可以更好地判别两种地貌类型,这一结论与图2得出的结论一致。

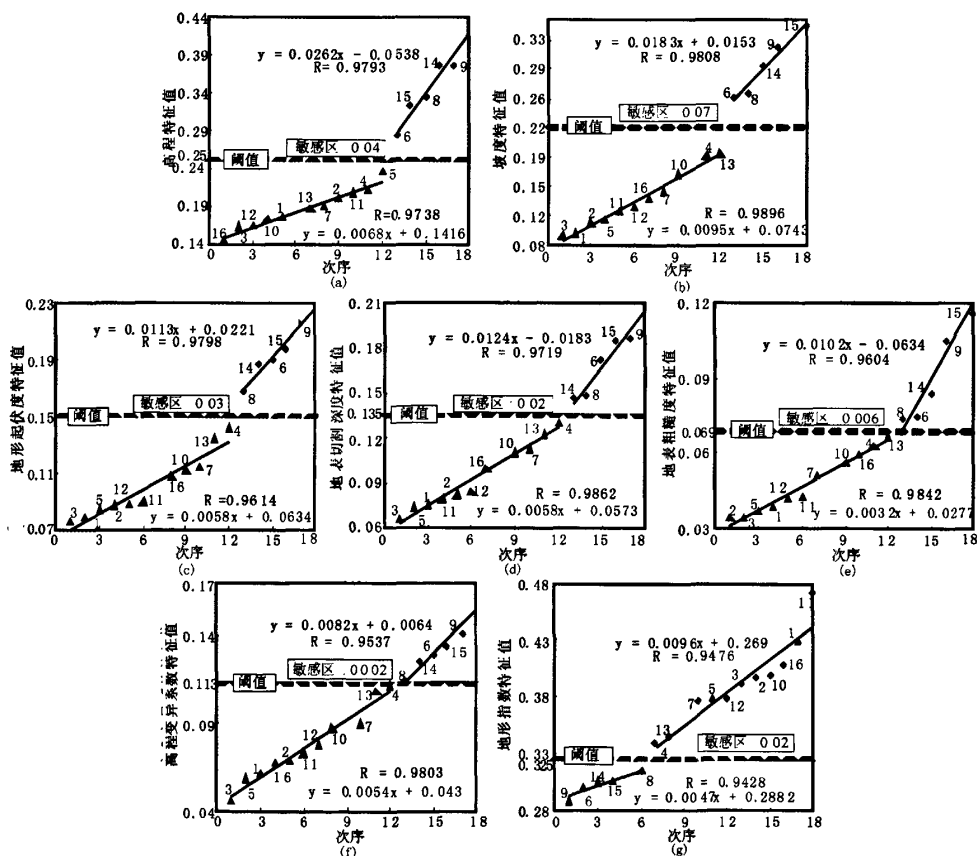


图3 地形因子特征值相关图

(点旁边的标注为流域编码)

Fig. 3 Correlation of landform factor eigenvalue (number of the points presents basin No.)

3.2 多因子聚类分析

图3表明各单个地形因子特征值在不同流域间的相关性,反映了地貌类型的相似性和差异性,但由

于地表切割深度、高程变异系数、地表粗糙度和地形指数计算的地形因子特征值敏感区较小,敏感区附近流域所属地貌类型判别存在困难(如高程变异系数特

征值敏感区附近的流域4、8(图3中的f图))。为此,本文进一步提出利用模糊聚类法将这些单个地形因子特征值进行多因子指标综合分析,可更为客观地判别地貌类型。

对每一流域所计算的各个地形因子特征值进行标准化处理,用欧氏距离法计算每个流域地形因子特征值之间的距离系数,使用离差平方和法对所测指标进行分类,得到模糊聚类谱系图(图4)。

按照图4所标的距离系数可以得出:当距离系数大于或等于5.5时,后寨河流域可分为两类:第一类由11个流域组成的峰林—盆地,第二类由其余5个流域组成的峰丛—洼地。

3.3 验证

为了验证上述方法的准确性,本文取剩余的两个流域(17和18流域)计算地形因子特征值(表1)。与图3中的阈值比较可知,流域17为峰林—盆地地貌类型,流域18为峰丛—洼地地貌类型,与两个流域所处地貌类型相符。

加入这两个流域的地形因子特征值进行聚类分析得出:17流域和7流域相近,距离系数为1.247,小

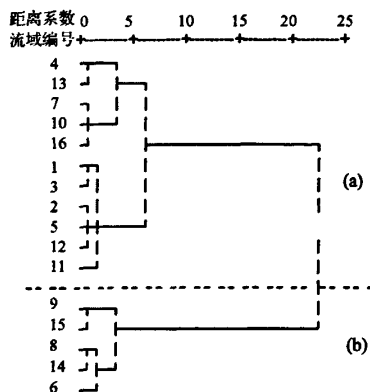


图4 模糊聚类谱系图

(a. 峰林—盆地; b. 峰丛—洼地)

Fig. 4 Results of fuzzy cluster

于5.5,归入a类,为峰林—盆地地貌类型;18流域和9流域相近,距离系数为5.929,大于5.5,归入b类,为峰丛—洼地地貌类型。因此,利用地形因子特征值对喀斯特地貌类型进行定量识别是可行的。

表1 流域地形因子特征值

Tab. 1 Landform factor eigenvalue of two basins

流域	高程	坡度	地形指数	地形起伏度	地表粗糙度	地表切割深度	高程变异系数
17	0.18	0.17	0.36	0.1	0.056	0.1	0.089
18	0.43	0.33	0.31	0.23	0.116	0.21	0.162

4 结论

本文利用DEM和GIS分析手段,建立了反映喀斯特流域整体地形特征的面积—地形因子曲线,提出了地形因子特征值定量指标。根据不同流域之间地形因子特征值的单因子统计分析和多因子聚类分析,可以定量判别地貌类型。以贵州省后寨河流域为例,分析结果表明:

(1)各类面积—地形因子曲线中,除面积—坡度曲线可较为明显地分类为两组曲线外,其它面积—地形因子曲线都难以进行地貌类型分类。

(2)本文提出的地形因子特征值可作为面积—地形因子曲线的定量分析指标,根据各流域地形因子特征值的相关性分析或聚类分析,可定量判别流域地貌类型。

(3)本文提出的地貌类型分类方法应用在后寨河流域,成功地定量判别峰林—盆地和峰丛—洼地两种

地貌类型,说明利用地形因子特征值对喀斯特地貌类型进行定量识别是可行的。

致谢:感谢中国科学院地球化学研究所、贵州省科技厅普定岩溶地质与生态研究综合试验站提供的帮助。

参考文献

- [1] 贺中华,梁虹,黄法苏,等. 基于DEM的喀斯特流域地貌类型的识别[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(3): 46—53.
- [2] 俞锦标,杨立铮,章海生,等. 中国喀斯特发育规律典型研究——贵州普定南部地区喀斯特水资源评价及其开发利用[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [3] 彭建,杨明德,梁虹. 基于GIS的路南巴江喀斯特流域地貌演化定量研究[J]. 中国岩溶, 2002, 21(2): 89—94.
- [4] Lyew-Ayee P., Viles H. A., Tucker G. E. The use of GIS-based digital morphometric techniques in the study of cockpit karst[J]. Earth Surface Processes And Landforms, 2007, 32

- (2): 165—179.
- [5] 梁虹, 杨明德. 喀斯特流域水文地貌系统汇流分析——以喀斯特峰丛洼地谷地流域为例[J]. 中国岩溶, 1995, 14(2): 186—193.
- [6] 焦树林, 梁虹. 喀斯特地区流域地貌与岩性的统计关系探讨——以贵州省为例[J]. 中国岩溶, 2002, 21(2): 95—100.
- [7] 梁虹. 喀斯特流域水文地貌造峰效应分析[J]. 中国岩溶, 1995, 14(3): 223—229.
- [8] 王在高, 梁虹, 杨明德. 喀斯特流域地貌类型对枯水径流的影响——以贵州省河流为例[J]. 地理研究, 2002, 21(4): 441—448.
- [9] 俞锦标, 章海生. 贵州普定岩溶地貌[J]. 中国岩溶, 1988, 7(2): 163—172.
- [10] 张兆干, 杨剑明, 王祥, 等. 喀斯特地貌地表空间结构分类及特征——以贵州普定县后寨地区为例[J]. 南京大学学报, 1996, 32(2): 302—308.
- [11] 张兆干, 杨剑明, 王祥, 等. 喀斯特地块空间结构研究——以普定后寨地下河流域为例[J]. 地理学报, 1997, 52(4): 345—352.
- [12] 贵州省普定岩溶研究综合试验站. 普定试验场——岩溶水资源模式及开发利用研究[R]. 1991.
- [13] 汤国安, 刘学军, 闫国年. 数字高程模型及地学分析的原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [14] 周启鸣, 刘学军. 数字地形分析[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [15] 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.

Categorization of karst landform on the basis of landform factor eigenvalue

XUE Xian-wu, CHEN Xi, ZHANG Zhi-cai, QIN Nian-xiu

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Hehai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: In this paper, digital elevation model (DEM) is used to divide sub-basin and seven landform factors that affect the karst geomorphology, including elevation, slope, relief amplitude, surface roughness, surface incision and elevation variance coefficient as well as topographic index, are extracted. A method of terrain factor eigenvalue is proposed for categorizing karst landform. Houzhai basin was chosen to be divided into eighteen basins. Sixteen basins were selected to distinguish their landform type, and the other two are chosen for the method verification. The statistical analysis of a single landform factor and fuzzy cluster analysis of multi-landform factors of the landform factor eigenvalue are carried out in order to determine the threshold of the peak cluster and peak forest landform in the Houzhai basin. The results demonstrate that the method based on landform factor eigenvalue is suitable for quantitative categorization of karst basin landform.

Key words: landform factor eigenvalue; area-terrain factor curve; karst landform, the Houzhai basin