

引用格式:李婧昕,许尔琪. 中国西南喀斯特地区正负地形的提取方法研究[J]. 资源科学, 2017, 39(10): 1989-1999. [Li J X, Xu E Q. Extraction of positive and negative terrain boundary in Karst region of Southwest China[J]. *Resources Science*, 2017, 39(10): 1989-1999.] DOI: 10.18402/resci.2017.10.17

# 中国西南喀斯特地区正负地形的提取方法研究

李婧昕<sup>1,2</sup>, 许尔琪<sup>2</sup>

(1. 北京林业大学自然保护区学院, 北京 100083;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101)

**摘要:**中国西南喀斯特地区在地貌形态上主要表现为以峰丛为主的正地形和以洼地为主的负地形。近年来,以正地形为主的喀斯特地区石漠化程度日益加剧,对这一地区生态修复的前提是进行合理的正负地形划分。本文以西南喀斯特7个典型地貌类型区为例,基于地表开度、地表曲率和地形起伏度三个地形因子,应用改进的局部方差法和阈值法确定最终的正负地形边界。结果显示,研究区正负地形分界处地表开度最佳阈值介于 $-2^{\circ}\sim-4^{\circ}$ 之间,正地形比例从42.80%~75.57%不等。最后,选取了三个景观格局因子对正负地形的差异加以描述,并分析了耕地在正负地形中的形态差异。今后不同地形因子组合对地表描述准确程度的量化研究及形态学方法与边缘检测等计算机自动提取方法的融合将是重点探讨的方向。

**关键词:**正负地形;中国西南喀斯特地区;地表开度;地表曲率;地形起伏度;阈值分割;坡耕地

DOI: 10.18402/resci.2017.10.17

## 1 引言

中国有大约130万 $\text{km}^2$ 的喀斯特景观,占全国土地总面积的13.5%,世界喀斯特地貌面积的3.4%<sup>[1]</sup>,中国西南部有着世界上面积最大、最集中的喀斯特连片区,面积超过55万 $\text{km}^2$ <sup>[2]</sup>。喀斯特地区千沟万壑、崎岖起伏,地势地貌错综复杂,其中包括了峰丛洼地、峰丛谷地、峰丛峡谷、峰林洼地、峰林峡谷等地貌组合。相对来讲,峰丛、峰林等较周围地形向上凸出,形成正地形,易直接受到风雨的侵蚀,一旦植被受到破坏,土壤难以保持,以碳酸盐为主的岩层外露;而洼地、谷地较周围地势向下凹陷,形成负地形,由于正地形的阻挡而风速低且较少受到雨水的直接冲刷,易于土壤积累,故土壤相对肥沃,耕地和其他人类生活场所多集中于此。若以耕地数量代表土地承载力,则以峰丛为主的正地形和以洼地为主的负地形土地承载力截然不同<sup>[3]</sup>。

总体来讲,喀斯特地区环境承载力低、生态系

统脆弱、自我修复能力差。近些年来,中国西南喀斯特地区石漠化程度明显,除全球气候变化作用外,更主要的是人为活动的影响,过度采伐、不合理的耕作和放牧制度导致植被破坏,土壤层变薄甚至消失,同时地表水资源短缺。如果能够宏观地掌握正负地形分布,再结合地质背景和生境资料,就可以因地制宜科学高效恢复植被,加强水土保持,并发展适宜不同地形的农林牧生产制度,带动当地居民脱贫致富<sup>[4]</sup>。

刘迪生曾给出广义上的正负地形定义,认为正地形是凸起的地形,负地形是凹陷的地形<sup>[5]</sup>。目前中国对于正负地形提取的研究主要集中于黄土高原地区,这些方法基本实现了定性半定量相结合,总体上可分为两类,一类是基于DEM的形态学分析方法,如景观形态、三维形态和地形发育特征指标相结合的方法<sup>[6]</sup>、地表开度差值阈值划分法<sup>[7]</sup>、坡度变异与剖面曲率信息结合的方法<sup>[8]</sup>等;另外一

收稿日期:2017-08-23;修订日期:2017-09-05

基金项目:国家自然科学基金项目(41601095);国家重点基础研究发展计划(973计划)(2015CB452702)。

作者简介:李婧昕,女,吉林通化人,硕士,主要研究方向为基于GIS的自然保护区规划与管理。E-mail:li\_jx@bjfu.edu.cn

通讯作者:许尔琪,E-mail:xueq@igsnrr.ac.cn

种是基于计算机编程或模型的方法,如区域生长法<sup>[9]</sup>、多方位地形晕染法<sup>[10]</sup>、Snake 模型法<sup>[11]</sup>、边缘检测<sup>[12]</sup>等算法。在周毅的研究中,则给出了较为严格的黄土高原正负地形定义<sup>[6]</sup>。然而,对于喀斯特地区专门针对正负地形分析的研究几乎空白,仅有少量文字定性地提到喀斯特地区正地形包括以锥峰为主体的峰林、峰丛,负地形包括洼地、谷地、盆地等<sup>[13-15]</sup>,这种简单的分类并不能对正负地形的提取以及进一步的研究起到实质性的作用。因此,本文借助黄土高原研究的已有经验,结合喀斯特地区独有的地貌特点,利用基于DEM地形因子提取的形态学方法结合定量的统计分析尝试对所选的7个典型地貌样区进行正负地形划分。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

考虑到以贵州为中心的东亚喀斯特连片区是世界喀斯特发育最典型、最复杂、景观与生态类型最多的一个片区,为能够充分表达这一地区喀斯特地形的复杂性,本文根据不同地貌类型选取了7个典型区域进行研究,研究区区位图及基本信息见图1和表1。综合制图精度和计算效率,采用2009年分辨率30m的DEM数据<sup>[16]</sup>,同时为尽可能避免高程数据本身以及数字化过程中的误差,对实验区数据进行均值滤波处理。

2.2 研究方法

正负地形的分界线可以看作是一类结构分界线。对于这种分界线的划分一般有两种方法。一种是形态学方法,基于DEM的衍生地形参数进行描绘,具有实际地理意义,考虑了空间形态特征,但是参数的选择不同,DEM分辨率不同,以及分析窗口大小的不同,都会对最终结果产生影响<sup>[17]</sup>。另外

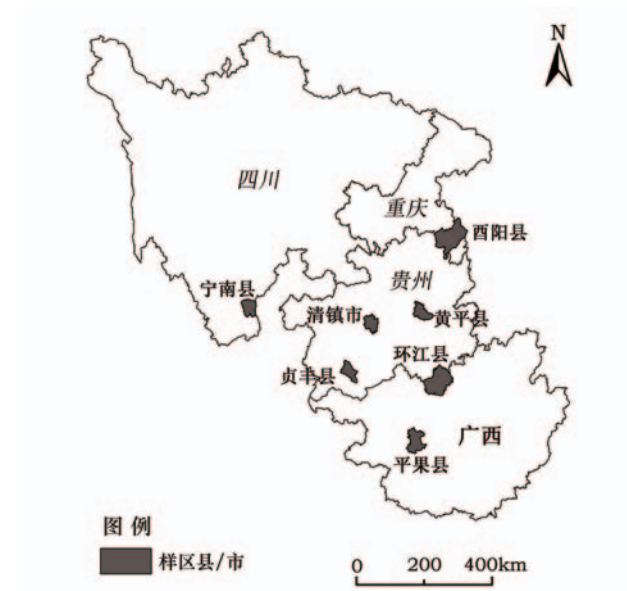


图1 7个典型地貌样区区位

Figure 1 The distribution of seven typical Karst terrain areas

一种是编程与模型结合的方法,虽然利用边缘检测等算法可以提高识别精度<sup>[12]</sup>,但是却忽视了地学意义,多次迭代计算时间成本高、地形划分连续性较差。本文选择形态学方法进行正负地形提取,充分考虑该方法的优缺点并尽可能做定量描述,以提高其科学性和合理性。

2.2.1 地形因子的选取

地表开度(Openness)是本文进行分析的核心地形因子,由日本研究人员 Yokoyama 等于2002年首次提出<sup>[18]</sup>,最初的设计目的是用来增强DEM二维平面的三维可视化效果<sup>[19]</sup>,其原理为通过一定半径L内8个方向的天顶角和天底角平均值来表现不规则表面的凹凸程度的大小,其中正开度代表地形凸起程度,负开度代表地形凹陷程度。开度的特点是摒弃了传统的无差异性的规则矩形的计算单元,而

表1 中国西南喀斯特7个典型地貌样区基本信息

Table 1 The basic information of seven typical Karst areas in Southwest China

样区编号	地区	基本地貌类型	平均海拔/m	坐标范围
一区	西阳土家族苗族自治县	岩溶槽谷	766.33	28°19'40" N -29°24'23"N, 108°18'33" E -109°19'0"E
二区	宁南县	岩溶断陷盆地	1 968.13	26°50'13" N -27°18'32"N, 102°27'45" E -102°55'1"E
三区	清镇市	岩溶高原	1 280.83	26°23'58" N -26°56'8"N, 106°7'10" E -106°32'45"E
四区	黄平县	岩溶高原-槽谷过渡	884.44	26°43'55" N -27°14'24"N, 107°35'42" E -108°11'45"E
五区	贞丰县	岩溶峡谷	1 006.22	25°6'44" N -25°43'3"N, 105°25'21" E -105°55'18"E
六区	环江毛南族自治县	岩溶高原-峰丛洼地过渡	510.47	24°43'42" N -25°32'25"N, 107°49'58" E -108°42'53"E
七区	平果县	岩溶峰丛洼地	335.52	23°12'11" N -23°53'57"N, 107°17'55" E -107°52'47"E

2017年10月

是求取以观察点为中心的观察半径 $L$ 内8个方向观察范围内天顶角、天底角最值的均值,能够在一定程度上自动调整和适应地形起伏变化情况,更好地顾及地貌空间分布的多尺度特性<sup>[7]</sup>,精度更高。但也正是这个原因,造成了计算时间成本的增加。

此外,考虑到喀斯特地貌特殊的空间形态特征,再分别选取地表曲率(Curvature)和地形起伏度(Relief Amplitude, RA)作为代表性的微观和宏观地形因子进行正负地形提取的辅助判别。地表曲率是由DEM衍生出的常用微观地形因子,又被称为坡度之坡度,是地表的二阶导数,用于描述地形的起伏变化程度大小。地形起伏度是指一定分析窗口内高程的最大值与最小值之差(即高程的变化范围),对于定量描述地貌、划分地貌类型,都有极其重要的意义<sup>[20]</sup>。

### 2.2.2 适宜分析窗口的确定

地形存在着广泛的多尺度特性。对尺度效应的描述主要利用“尺度-尺度效应曲线”<sup>[21]</sup>。对于某一区域的地形,如果已经确定了具体的研究区范围,特定分辨率的DEM数据以及明确的地形因子,那么分析窗口的合理与否将对结果产生重大影响。

利用DEM数据本身所含信息进行适宜窗口选取,源于对遥感影像适宜分辨率的选择。常用的方法包括方差法、变异函数法、均值变点法等等。无论是哪种方法,其核心思想都是寻求不同分析窗口地物信息差异程度的最大值<sup>[22]</sup>。本文采用平均局部方差法(Average Local Variance, ALV),简称局部方差法,由Woodcock等于1987年首次提出<sup>[23]</sup>。但传统的局部方差法具有一定的缺陷,在用相同窗口对不同分辨率或变化窗口对相同分辨率的DEM进行分析时,由于分析窗口内的地表范围不同,导致局部方差必然不同,因为空间统计学和地理学的基本前提和假设就是距离越近的地物相似度越高,距离越远的地物相似度越低,不同尺度分析窗口的属性值之间不具有可比性。基于此,本文对传统局部方差算法进行了改进:

$$S = \frac{S_N}{N^2} \quad (1)$$

式中 $S$ 为规范化局部方差; $N$ 为分析窗口边长对应的像元数; $S_N$ 为 $N \times N$ 分析窗口的局部方差。改进

后, $S$ 代表了单位范围内承载的局部方差大小, $S$ 值越大,窗口内单位像元面积内表达地形差异的效率就越高,实现了方差的规范化,具有可比性。建立 $S-N$ 尺度效应曲线,峰值所对应的窗口大小即为最佳分析窗口。

### 2.2.3 正负地形开度差值阈值的确定

阈值是正负地形划分的关键。首先要确定初始阈值范围,对范围内的数值取整作为阈值集,并得到初始阈值集相对应的开度差值二值图,进一步提取其二值边界处的地表曲率和地形起伏度数据。一般认为,开度差值越倾向于阈值的负半轴,所处地形越倾向于负地形,反之越倾向于正地形,故理论上正负地形交界处开度差值应接近于 $0^\circ$ <sup>[7]</sup>。加之喀斯特地区正负地形之间差异较大,所以地形起伏度应该达到或接近最大值,坡度由平缓处突增或从较大值下降到平缓处,则曲率呈现正负交界的过渡状态,同时符合三者的阈值为最终阈值。

### 2.2.4 边界提取及后处理

正负地形分界线作为一条地形线或地貌线,应该具有宏观、简洁、连续、封闭的特点,但经过上述方法提取得到的正负地形边界某些地区较为破碎。针对这一问题,本文采用数学形态学算法进行修补。实验证明,删除细碎小斑及采用一次膨胀运算能在保持原有边界基本不变的情况下达到最好效果。同时,为确保划分出的负地形不会在特殊地区出现较大误差,提取了每个样区的山脊线,并与初始负地形做差值运算,以去除负地形中的山脊部分。

### 2.2.5 正负地形形态差异分析

为便于理解正负地形形态差异,本文从二维、三维景观形态特征的角度选取了形态指数、破碎度和平均高程差3个因子进行描述。

(1)形态指数,可以描述正负地形斑块边界的复杂程度,数值越大越复杂。计算方法为:

$$X = \frac{0.25E}{\sqrt{A}} \quad (2)$$

式中 $X$ 为正(负)地形形态指数; $E$ 为正(负)地形斑块边界总长度(m); $A$ 为正(负)地形斑块总面积( $m^2$ )。

(2)破碎度,用来描述正负地形的破碎化程度,



数值越大破碎化程度越高。计算方法为:

$$F = \frac{M}{A} \quad (3)$$

式中  $F$  为正(负)地形破碎度;  $M$  为正(负)地形斑块总个数;  $A$  为正(负)地形斑块总面积( $\text{m}^2$ )

(3) 平均高程差, 用来描述正、负地形高程差异, 计算方法为:

$$H = H_z - H_f \quad (4)$$

式中  $H$  为平均高程差( $\text{m}$ );  $H_z$  为正地形平均高程( $\text{m}$ );  $H_f$  为负地形平均高程( $\text{m}$ )。式中, 形态指数和破碎度不仅可以针对正、负两类地形进行计算, 也可以对整个研究区进行计算。若考虑完整的喀斯特地貌的演化过程, 理想情况下整个样区的形态指数、破碎度和平均高程差数值的变化过程应该是初期先增大、中期由大转小、晚期趋向于早期的低值并于最后保持平稳, 因为喀斯特地貌演化的本质从形态上讲就是相对平整的正地形被侵蚀为高程更低的相对平整的负地形的过程。

### 3 结果及分析

#### 3.1 地形因子适宜窗口分析

##### 3.1.1 地形起伏度的适宜窗口分析

运用改进的规范化局部方差法对所选的7个实验区的地形起伏度进行从  $3 \times 3$  至  $31 \times 31$  奇数像元窗口范围的适宜性分析, 结果见图2。根据规范化局部方差值越大越能更好地描述地形与地表关系的原则可以看出, 无论在哪一个实验区, 规范化局部

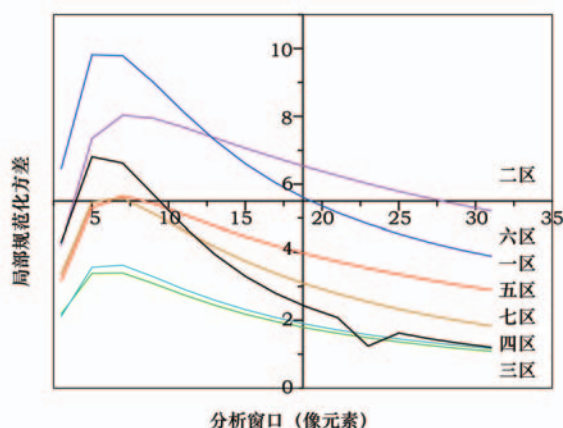


图2 研究区地形起伏度分析窗口大小与局部规范化方差的关系

Figure 2 The relationship between analysis window size of relief amplitude and average local variance in study areas

方差均呈现前期快速增加, 在达到峰值后期缓慢减小的趋势, 且峰值全部集中于  $5 \times 5$  和  $7 \times 7$  窗口, 说明此时为实验区进行起伏度分析的最佳窗口, 最终确定为: 实验一区至实验五区地形起伏度的适宜分析窗口大小为  $7 \times 7$ , 实验六区和实验七区为  $5 \times 5$  窗口。

##### 3.1.2 地表开度的适宜窗口分析

选择的观察半径范围从  $30 \sim 510 \text{m}$  (即以  $1 \sim 17$  个像元长度为观察半径), 分别计算不同实验区不同分析窗口的正、负开度, 并同理分析其规范化局部方差以确定最佳观察半径, 结果如图3。可以看出, 所有实验区的正负开度数据均值及方差都具有极为相似的变化趋势: 实验区内平均正负开度的变化趋势几乎完全相同, 呈现出较为平滑、缓慢的变化, 随着分析半径的增加, 均值的变化率逐渐减小, 原因是当分析窗口增大后, 更突出了地形的宏观变化趋势, 削弱了微观变化趋势, 微观变化体现在数据上可能会呈现较复杂的非线性变化, 而宏观变化则是相对平滑的线性变化。对于传统的平均局部方差数据, 随着分析半径的增加, 正开度的均值几乎始终大于负开度, 这与喀斯特地区的地形有关。在喀斯特地区, 除少数地表切割深度较大的峡谷、天坑等特殊的凹陷地形区外, 负地形区总体下陷程度并不明显, 边缘大多与平地平滑相连; 而正地形区则恰恰相反, 峰丛是实验区最主要的正地形, 其往往是毫无过度拔地而起, 坡度大曲率高, 加之峰丛内部个体高程差异大于洼地, 所以会呈现这样的方差变化趋势。而对于最适分析窗口的选择, 仍然沿用规范化局部方差法确定, 当分析半径为  $30 \text{m}$  时规范化局部方差为最大值, 此后急剧减小, 直到趋于平缓最终与横坐标轴渐近。因此  $30 \text{m}$  为开度分析的最佳窗口大小, 此时单位面积所能表达的地表地形差异为最大。

另外, 考虑到地表曲率为微观地形因子, 为充分体现细节, 认为原始曲率数据分析窗口为最佳分析窗口 (ArcGIS10.2 中默认以  $3 \times 3$  窗口进行曲率数据的计算)。

#### 3.2 正负地形地表开度最佳分割阈值的确定

用最佳分析半径  $30 \text{m}$  计算得到的地表正负开度作差得到开度差值图, 其值域几乎涵盖了  $[-90^\circ, 90^\circ]$  的全部区间, 选择阈值对其进行划分获得的差

2017年10月

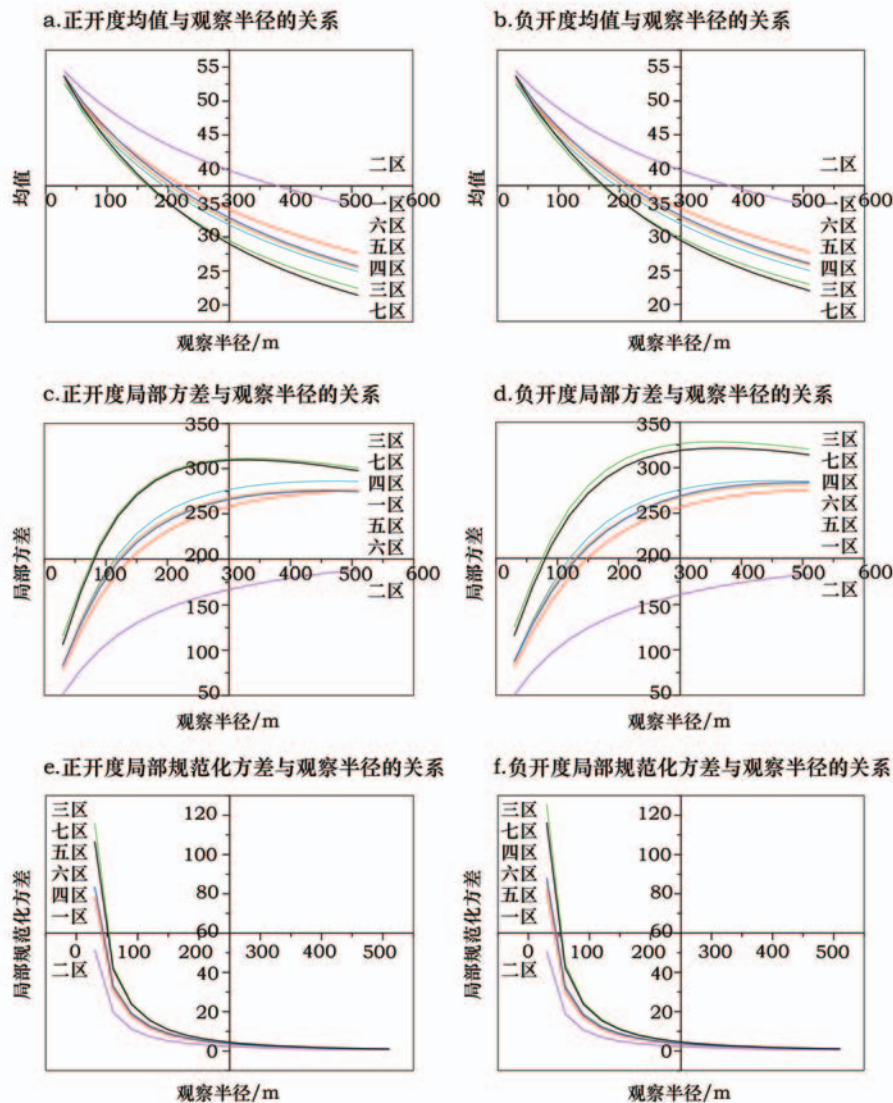


图3 研究区观察半径与地表开度不同参数间的关系

Figure 3 The relationship between analysis radiuses and different parameters of openness in study areas

值二值图便是正负地形分界图,因此,阈值的选取是正负地形提取技术的核心,其结果将直接影响正负地形划分的效果。首先,根据已有的研究成果,确定初始阈值划分范围为 $[-15, 15]$ <sup>[7]</sup>,在此范围内取整得到初始阈值集,绘制开度差值二值图并提取边界处的地表曲率和地形起伏度值,结果如图4所示。对比这31组数据,寻找能同时满足地表曲率近正负交界零点且地形起伏度达到或接近最大时的阈值。对于每一个试验区均存在较为对称的小于零和大于零的阈值,但由于大于0的初始阈值导致结果严重向正地形方向收缩,不符合实际情况,故选择每个区域小于0的阈值作为最终阈值。最终阈

值的选取结果及效果见表2及图5(见第1995页)。

对比最终提取结果可知,除一区外,样区内正地形比例全部大于负地形,这与对喀斯特地区总体上山多平地少的认知是符合的。以正负地形的比例将7个样区划分为四类:第一类是正地形比例超过70%的二区,所处地貌类型为岩溶断陷盆地,其正负地形边界处的平均曲率和地形起伏度也为七区之首;第二类是正地形比例介于60%~70%之间的六区、五区,所处地貌类型分别为岩溶高原-峰丛洼地过渡地带及岩溶峡谷;第三类为正地形比例介于50%~60%的四区、七区和三区,所处地貌类型分别为岩溶高原-槽谷过渡地带、岩溶峰丛洼地及岩溶高

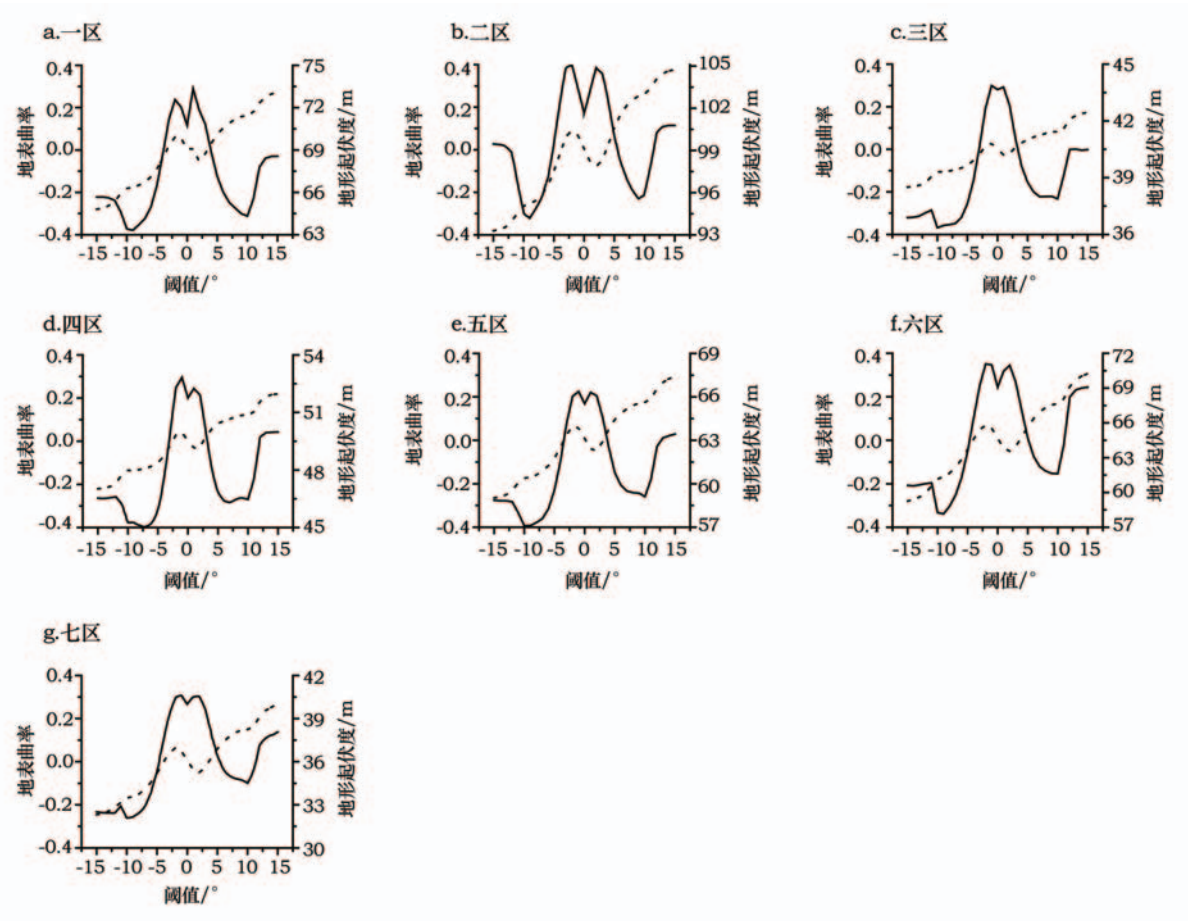


图4 研究区不同初始阈值时的地表曲率与地形起伏度分析

Figure 4 The value of curvature and relief amplitude at different thresholds in study areas

表2 研究区最终阈值选取及地形因子提取结果

Table 2 Final thresholds and terrain parameter results in study areas

分类	样区编号	最终阈值 / $^{\circ}$	平均曲率	平均地形起伏度 /m	样区总面积 /亿 $\text{m}^2$	正地形比例 /%	负地形比例 /%
一类	二区	-3	0.060	104.89	16.72	75.57	24.43
二类	六区	-4	0.005	66.39	45.61	62.64	37.36
二类	五区	-3	0.026	64.16	15.15	61.90	38.10
三类	四区	-2	0.029	52.29	16.66	59.39	40.61
三类	七区	-3	0.040	39.21	24.66	53.99	46.01
三类	三区	-2	0.014	42.66	15.00	52.78	47.22
四类	一区	-3	0.021	71.20	51.73	42.80	57.20

原;第四类为正地形比例小于50%的一区,所处地貌类型为岩溶槽谷。总体来看,在最终阈值确定后,正地形比例与平均曲率、平均地形起伏度都有较强的正相关性,随着正地形比例的增加,曲率和地形起伏度也随之增加,这也说明了在喀斯特地区,正地形对区域地形属性变异程度起到了决定性作用。

3.3 正负地形演化过程形态差异分析

为便于理解正负地形形态差异,本文选取了形态指数、破碎度和平均高程差3个因子进行描述。其中形态指数和破碎度均针对正、负两类地形分别计算。7个样区因子的计算结果见表3。

由结果可知,对于所有的7个样区,负地形形态指数始终大于正地形形态指数,考虑到负地形地区



2017年10月

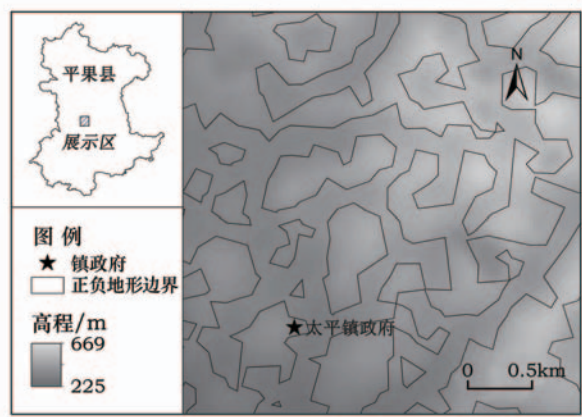


图5 研究区最终提取正负地形边界结果展示(以平果县为例)

Figure 5 The final extracted result of positive and negative terrain boundary in study areas (take pingguo county, the seventh area of study areas as an example)

为当地最主要的居民聚居区,说明人为活动对负地形的景观形态有着显著影响。不同于正、负地形形态指数间的正相关关系,当正地形破碎度较大时,负地形破碎度通常较小,反之亦然。位于岩溶槽谷地区的一区有着最高的正、负地形形态指数,但正地形破碎度极小,同时正地形比例极高,可以认为这一区域处于喀斯特地貌发育初期,且受人为因素影响不大。位于断陷盆地的二区正地形形态指数最低、破碎度最低、正地形比例最低,而负地形形态指数最低、破碎度最高、负地形比例最小,同时正负地形平均高程差最大,说明这一地区能提供给人类生产生活利用的空间很小,所以当地居民不得不尽可能开发所有可用土地,导致负地形破碎化程度极高。正地形破碎度最高的地区为岩溶高原的三区,

表3 研究区正负地形形态差异因子分析

Table 3 Variance analysis of four factors of positive and negative terrain in study areas

样区编号	正地形形态指数	负地形形态指数	正地形破碎度 /( $\times 10^{-6}$ )	负地形破碎度 /( $\times 10^{-6}$ )	正负地形平均 高程差/m
一区	106.71	142.70	1.2	1.0	56.50
二区	41.37	71.93	0.3	2.9	90.22
三区	78.66	83.11	4.1	0.7	24.71
四区	69.80	83.93	2.1	0.8	41.70
五区	61.78	78.74	1.8	1.0	15.28
六区	104.54	134.39	1.5	0.7	57.90
七区	100.16	107.66	3.2	0.6	39.00

其负地形破碎度几乎最低,正、负地形形态指数值较低且最均衡,但这并不意味着这一区域人为活动少,而是因为岩溶高原整体地势平坦,不论正负地形都有可利用的空间,人为活动区域边界较为模糊。就喀斯特地貌分布最广的贵州省而言,岩溶高原区的经济情况远高于全省平均水平,土壤肥力总体水平高,土地生产率高,因而经济结构也更加合理,第一产业比重小、第三产业比重大<sup>[24]</sup>,这也说明了喀斯特地区可利用土地数量对当地经济的重要性。

若将喀斯特地貌的演化过程简化假设为岩溶高原—岩溶高原-峰丛洼地过渡—岩溶峰丛洼地,由表3可知,正、负地形的形态指数变化趋势先增后减,即边界的变化为从简单到复杂最后又简单的过程;负地形破碎度先增再减,正地形刚好相反;高程差呈现较为明显的先增后减。由于本文样区数量有

限,不同样区的初期本底情况、后期所受各方面因素影响程度不同,而针对某些典型区域进行完整地质周期的监测几乎是不可能的,加之正负地形提取结果精度的影响,以上数据仅能对当前时期样区内的正负地形形态提供一定误差范围内的参考。

3.4 正负地形差异应用示例—耕地分布

近年来,喀斯特地区石漠化现象日益加剧,水土流失极为严重,导致这一现状的根本原因是过度的人类活动远超出环境的自我修复能力。喀斯特地区土层薄、结构差<sup>[25]</sup>、不连续<sup>[26]</sup>,负地形利于土壤及养分的积累,适宜作物生长,而正地形多受风化侵蚀甚至岩石外露,有些地方甚至寸草不生,理论上负地形中的耕地面积要远大于正地形,但事实是由于负地形面积有限,人口增长与耕地面积有限的矛盾难以协调,因此当地居民不得不以坡耕地的形

式解决基本的温饱问题,这种过度开垦使得原本脆弱的生态系统变得不堪一击。基于此,本文以耕地在正负地形中的分布为视角,突出对比正负地形的形态差异。选取2015年Landsat-8遥感影像(分辨率30m)<sup>[27]</sup>,解译得到7个研究区的耕地分布信息,同时根据30m分辨率的DEM生成坡度图,将两者叠加分析,最终位于正地形范围内耕地的统计结果见表4。

由表4可知,7个研究区中,除一区和二区外,负地形耕地占负地形面积比例均高于正地形耕地占正地形比例,由于负地形相对正地形土壤层较厚,易于养分积累,是喀斯特地区适宜耕作的区域,符合实际情况。而对于一区和二区,正地形所占比例为7区之最,负地形地区本身所占比例很小,既要作为当地居民的主要生活区域,又要开垦利用,面积有限,故正地形虽然相对负地形坡度大、养分少、难以利用,但正地形耕地占正地形面积比例远高于负地形耕地所占负地形比例。7个样区中二区的坡耕地状况最为严峻,正地形耕地平均坡度值达到最高的19.32°,超过15°的陡坡和超过25°的极陡坡坡耕地比例甚至达到区域正地形耕地总面积的73.28%,这意味着当地坡耕地极易受水土流失的侵蚀且不易恢复。已有研究表明,坡耕地的土壤水稳团聚体含量远小于原生林、次生林或撂荒地,土壤结构不稳定<sup>[28]</sup>;同时喀斯特地区并不缺乏降水,降水导致的坡面的产流产沙与坡度呈显著正相关,坡度越大,侵蚀等级也越高<sup>[29]</sup>;在一定条件下,坡面达到25°时的产流产沙就能够达到最大值且与坡度为20°时的情况相近<sup>[30]</sup>。在三区和七区,占比超过30%的0~6°平坡耕地坡度的均值分别为5.69°和5.74°,

几乎处于平地 and 缓坡耕地分界线。除三区和七区外,其他样区大于6°的坡耕地比例都达到或超过80%,在二区更是达到96.10%,情况不容乐观,必须因地制宜提出相关政策,防止恶性循环,缓解人地矛盾。在已出现荒漠化的地区,还林还草有利于土壤生态系统的恢复<sup>[31]</sup>;其他地区也要依据实际情况对坡耕地进行整治,实现保土保水保肥,为未来喀斯特地区的精准农业的实现奠定基础<sup>[24]</sup>。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

本文充分考虑喀斯特地貌的特点,应用开度差值阈值划分法,在中国西南部选择7个典型地貌区进行案例研究,结果表明:

(1)考虑到地形的多尺度特性及传统局部方差法的不足,应用改进的规范化局部方差法对地形起伏度和地表开度进行适宜分析窗口分析,结果显示样区一至样区五最佳地形起伏度分析窗口为7×7,样区六至样区七为5×5;7个样区地表开度最佳分析半径均为30m。

(2)各样区正地形区域面积比例从42.80%~75.57%不等,正地形比例明显高于负地形,且随着正地形比例的增大,样区正负地形边界处的地形起伏度也总体呈增加趋势,说明在喀斯特地区正地形对整个区域的地形属性变异程度起到决定性作用。

(3)本文选取了形态指数、破碎度、平均高程差三个因子对不同发育时期的典型喀斯特地貌正负地形的特征进行了分析。岩溶槽谷区正、负地形形态指数最高,正地形比例高,但正地形破碎度极小,说明此区域受人类活动影响较小,正地形景观形态得以很好地发育;岩溶断陷盆地负地形比例最小,

表4 7个样区正地形各坡度梯度中坡耕地面积比例

Table 4 The ratio of slope land in positive terrain in seven research areas

样区编号	正地形耕地占 正地形比例/%	负地形耕地占 负地形比例/%	正地形耕地 平均坡度/°	0~6° 耕地占比/%	6°~15° 坡耕地占比/%	15°~25° 坡耕地占比/%	25°以上 坡耕地占比/%
一区	34.38	18.27	15.83	9.88	38.02	37.91	14.19
二区	27.02	21.42	19.32	3.90	22.82	41.93	31.35
三区	30.28	33.81	11.48	30.22	47.93	17.95	3.90
四区	27.46	28.93	12.33	15.68	55.03	26.08	3.21
五区	24.11	26.69	14.95	15.36	34.78	34.29	15.56
六区	14.56	17.49	13.55	20.02	40.35	27.40	12.22
七区	22.73	29.30	15.17	31.17	27.93	21.34	19.56



2017年10月

但破碎度最高,正负地形平均高差也最大,表明这一区域的适宜当地居民生产生活的空间有限,人为活动对狭小空间的景观形态影响很大;而岩溶高原区整体地势平缓,居民可利用土地多且土地生产率高。由于数据量小、各地区本底及所受环境影响情况不同,加之难以实现对样区进行完整地质周期内的监测,故仅能提供一定程度的参考。

(4)在划分出正负地形的基础上,对7个样区中耕地的分布情况进行了分析,发现耕地面积在负地形区域内并没有占据绝对优势,究其原因喀斯特地区人口增长而负地形面积有限,当地居民不得不开垦大量的正地形耕地利用坡耕地形式耕作,7个样区中正地形坡耕地坡度均值最小 $11.48^{\circ}$ ,最大值达 $19.32^{\circ}$ ,然而坡耕地的土壤结构差、不稳定,在降水过程中极易产流产沙导致水土流失,这也是近些年喀斯特地区石漠化加重的主要原因。因此必须采取积极策略整治坡耕地,缓解日益加剧的人地矛盾,防止恶性循环。

## 4.2 讨论

首先,除地表开度外,本文所采用的的地表曲率和地形起伏度已有研究较为深入,意义明确且易于提取,但三者的组合对地表形态的描述所能达到的精度没有足够的定量数据做支撑,也可尝试运用统计学方法找出一组最具代表性的组合因子来对研究区的地貌进行相对精确的描述,以提高对正负地形划分的精度。另外,对于地表开度,不仅要用正负开度的差值作为考察指标,还可以考虑用两者相加组成方程组或矩阵,明确每对正负开度数值组合的地形意义。最后,以边缘提取算子为代表的基于数学统计学的空间分析有明显的数量意义,但却脱离了地学或形态学意义;而以地学或形态学意义为主导时相对缺乏有力的数据支撑,尽可能找到一个平衡点来协调和互补两者之间的优缺点将是今后重点探讨的方向。

## 参考文献(References):

[1] 曹宇,赵羿,吴玉环.熵、水与景观[M].杭州:浙江大学出版社,2012. [Cao Y, Zhao Y, Wu Y H. Entropy, Water and Landscape [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2012.]

- [2] 苏孝良. 贵州喀斯特石漠化与生态环境治理[J]. 地球与环境, 2005, 33(4): 20-28. [Su X L. Karst rocky desertification and ecology rehabilitation in Guizhou Province[J]. *Earth and Environment*, 2005, 33(4): 20-28.]
- [3] 李阳兵, 罗光杰, 白晓永, 等. 典型峰丛洼地耕地、聚落及其与喀斯特石漠化的相互关系-案例研究[J]. 生态学报, 2014, 34(9): 2195-2207. [Li Y B, Luo G J, Bai X Y, et al. The correlations among arable land, settlement and karst rocky desertification-cases study based on typical peak-cluster depression [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(9): 2195-2207.]
- [4] 蒋忠诚, 李先琨, 曾馥平, 等. 岩溶峰丛洼地生态重建[M]. 北京: 地质出版社, 2007. [Jiang Z C, Li X K, Zeng F P, et al. Ecological Reconstruction of Peak-Cluster Depression Areas in Karst [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.]
- [5] 刘迪生. 小比例尺分层设色地势图的编制问题-以苏联 1:2500000 比例尺分层设色地势图为例[J]. 地理学报, 1957, 23(4): 447-458. [Liu D S. The problem of compiling small scale topographic map with color gradients-a case study of 1:2500000 scale topographic map with color gradients in Soviet Union[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1957, 23(4): 447-458.]
- [6] 周毅. 基于DEM的黄土正负地形特征研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2008. [Zhou Y. Investigation of Loess Positive and Negative Terrain Based on DEMs[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2008.]
- [7] 王轲, 王琤, 张青峰, 等. 地形开度和差值图像阈值分割原理相结合的黄土高原沟沿线提取法[J]. 测绘学报, 2015, 44(1): 67-75. [Wang K, Wang Z, Zhang Q F, et al. Loess shoulder line extraction based on openness and threshold segmentation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(1): 67-75.]
- [8] 朱红春, 汤国安, 张友顺, 等. 基于DEM提取黄土丘陵区沟沿线[J]. 水土保持通报, 2003, 23(5): 43-61. [Zhu H C, Tang G A, Zhang Y S, et al. Thalweg in Loess Hill Area based on DEM[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2003, 23(5): 43-61.]
- [9] 刘玮, 李发源, 熊礼阳, 等. 基于区域生长的黄土地貌沟沿线提取方法与实验[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(2): 220-226. [Liu W, Li F Y, Xiong L Y, et al. Shoulder line extraction in the Loess Plateau based on region growing algorithm[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2016, 18(2): 220-226.]
- [10] 陈永刚, 汤国安, 周毅, 等. 基于多方位DEM地形晕渲的黄土地貌正负地形提取[J]. 地理科学, 2012, 32(1): 105-109. [Chen Y G, Tang G A, Zhou Y, et al. The positive and negative terrain of loess plateau extraction based on the multi-azimuth DEM shaded relief[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(1): 105-109.]
- [11] 周毅, 汤国安, 习羽, 等. 引入改进Snake模型的黄土地形沟沿线连接算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(1): 82-85. [Zhou Y, Tang G A, Xi Y, et al. A shoulder-lines connection

- algorithm using improved snake model[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(1): 82-85.]
- [12] 晏实江, 汤国安, 李发源, 等. 利用DEM边缘检测进行黄土地貌沟沿线自动提取[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(3): 363-367. [Yan S J, Tang G A, Li F Y, et al. An edge detection based method for extraction of loess shoulder-line from grid DEM[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(3): 363-367.]
- [13] 熊康宁, 肖时珍, 刘子琦, 等. “中国南方喀斯特”的世界自然遗产价值对比分析[J]. 中国工程科学, 2008, 10(4): 17-28. [Xiong K N, Xiao S Z, Liu Z Q, et al. Comparative analysis on world natural heritage value of South China[J]. *Engineering Sciences*, 2008, 10(4): 17-28.]
- [14] 许模, 王迪, 漆继红, 等. 基于分形理论的喀斯特地貌形态分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2011, 38(3): 328-333. [Xu M, Wang D, Qi J H, et al. Study on morphological characteristics of karst landform based on the fractal theory[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2011, 38(3): 328-333.]
- [15] 龙翠玲. 不同地形部位喀斯特森林物种多样性的比较研究-以贵州茂兰自然保护区为例[J]. 中国岩溶, 2007, 26(1): 55-60. [Long C L. Comparison of species diversity in karst forest among different topography sites-a case study in Maolan Natural Reserve, Guizhou Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2007, 26(1): 55-60.]
- [16] 中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台. GDEM V2 30M 分辨率数字高程数据[EB/OL]. (2015-01-06) [2017-09-13]. [http://www.gscloud.cn/sources/list\\_dataset/310?cdatid=302&pdid=10&datatype=gdem\\_utm#dlv=Wzg4LFswLDEwLDEsMF0sW1siZGF0YWkiwXV0sW10sOTId](http://www.gscloud.cn/sources/list_dataset/310?cdatid=302&pdid=10&datatype=gdem_utm#dlv=Wzg4LFswLDEwLDEsMF0sW1siZGF0YWkiwXV0sW10sOTId). [Geospatial Data Cloud site, Computer Network Information Center, Chinese Academy of Sciences. 30m Resolution Data of Global Digital Elevation Model Version 2. [EB/OL]. (2015-01-06) [2017-09-13]. [http://www.gscloud.cn/sources/list\\_dataset/310?cdatid=302&pdid=10&datatype=gdem\\_utm#dlv=Wzg4LFswLDEwLDEsMF0sW1siZGF0YWkiwXV0sW10sOTId](http://www.gscloud.cn/sources/list_dataset/310?cdatid=302&pdid=10&datatype=gdem_utm#dlv=Wzg4LFswLDEwLDEsMF0sW1siZGF0YWkiwXV0sW10sOTId).]
- [17] 刘学军, 张萍, 朱莹. DEM坡度计算的适宜窗口分析[J]. 测绘学报, 2009, 38(3): 264-271. [Liu X J, Zhang P, Zhu Y. Suitable window size of terrain parameters derived from grid-based DEM[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, 38(3): 264-271.]
- [18] Yokoyama R, Shirasawa M, Richard J P. Visualizing topography by openness: a new application of image processing to digital elevation models[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2002, 68(3): 257-265.
- [19] 张玲, 杨晓平, 魏占玉, 等. 三维数据的二维可视化方法综述[J]. 地震地质, 2014, 36(1): 275-284. [Zhang L, Yang X P, Wei Z Y, et al. Overview of visualization methods of three dimensional topographic data[J]. *Seismology and Geology*, 2014, 36(1): 275-284.]
- [20] 刘爱利. 基于1:100万DEM的我国地形地貌特征研究[D]. 西安: 西北大学, 2004. [Liu A L. A Research on the Geomorphologic Characterization of China Based on the 1:10,000,000 DEM[D]. Xian: Northwestern University, 2004.]
- [21] 呼雪梅, 秦承志. 地形信息对确定DEM适宜分辨率的影响[J]. 地理科学进展, 2014, 33(1): 50-56. [Hu X M, Qin C Z. Effects of different topographic attributes on determining appropriate DEM resolution[J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(1): 50-56.]
- [22] Cao C, Lam N S. Understanding the Scale and Resolution Effects in Remote Sensing and GIS[A]. Quattrochi D A, Goodchild M F. Scale in Remote Sensing and GIS[C]. New York: CRC/Lewis Publishers, 1997.
- [23] Woodcock C E, Strahler A H. The factor of scale in remote sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1987, 21(3): 311-332.
- [24] 熊康宁, 黎平, 周忠发, 等. 喀斯特石漠化的遥感-GIS典型研究-以贵州省为例[M]. 北京: 地质出版社, 2002. [Xiong K N, Li P, Zhou Z F, et al. RS-GIS Typical Research of Karst Rocky Desertification- A Case Study in Guizhou Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002.]
- [25] 陈佳, 陈洪松, 冯腾, 等. 桂西北喀斯特地区不同土地利用类型土壤抗蚀性研究[J]. 中国生态农业学报, 2011, 20(1): 105-110. [Chen J, Chen H S, Feng T, et al. Anti-soil erodibility of different land use types in Northwest Guangxi Karst Regions[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(1): 105-110.]
- [26] 吴敏, 刘淑娟, 叶莹莹, 等. 喀斯特地区坡耕地与退耕地土壤有机碳空间异质性及其影响因素[J]. 生态学报, 2016, 36(6): 1619-1627. [Wu M, Liu S J, Ye Y Y, et al. Spatial variability of surface soil organic carbon and its influencing factors in cultivated slopes and abandoned lands in a Karst peak-cluster depression area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(6): 1619-1627.]
- [27] 中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台. Landsat-8 OLI\_TIRS 卫星数字产品[EB/OL]. (2017-04-30) [2017-09-13]. [http://www.gscloud.cn/sources/list\\_dataset/411?cdatid=263&pdid=10&datatype=OLI\\_TIRS#dlv=zg4LFswLDEwLDEsMF0sW1siZGF0YWRhdGUiLDBdXSxbXSsw5OV0%3D](http://www.gscloud.cn/sources/list_dataset/411?cdatid=263&pdid=10&datatype=OLI_TIRS#dlv=zg4LFswLDEwLDEsMF0sW1siZGF0YWRhdGUiLDBdXSxbXSsw5OV0%3D). [Geospatial Data Cloud Site, Computer Network Information Center, Chinese Academy of Sciences. Satellite Digital Product of Landsat-8 OLI\_TIRS. [EB/OL]. (2017-04-30) [2017-09-13]. [http://www.gscloud.cn/sources/list\\_dataset/411?cdatid=263&pdid=10&datatype=OLI\\_TIRS#dlv=zg4LFswLDEwLDEsMF0sW1siZGF0YWRhdGUiLDBdXSxbXSsw5OV0%3D](http://www.gscloud.cn/sources/list_dataset/411?cdatid=263&pdid=10&datatype=OLI_TIRS#dlv=zg4LFswLDEwLDEsMF0sW1siZGF0YWRhdGUiLDBdXSxbXSsw5OV0%3D).]
- [28] 张喜. 贵州喀斯特山地坡耕地立地影响因素及分区[J]. 南京林

2017年10月

- 业大学学报(自然科学版), 2003, 27(6): 98-102. [Zhang X. Effects on slope cropland site and site classification of Guizhou Karst Upland[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2003, 27(6): 98-102.]
- [29] 袁应飞, 戴全厚, 李昌兰, 等. 喀斯特典型坡耕地模拟降雨条件下的土壤侵蚀响应[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 24-28. [Yuan Y F, Dai H Q, Li C L, et al. Response of soil erosion in simulated condition rainfall on typical slope farmland in Karst [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(3): 24-28.]
- [30] 于扬, 杜虎, 宋同清, 等. 喀斯特峰丛洼地不同生态系统的土壤肥力变化特征[J]. 生态学报, 2013, 33(23): 7455-7466. [Yu Y, Du H, Song T Q, et al. Characteristics of soil fertility in different ecosystems in depressions between karst hills[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(23): 7455-7466.]
- [31] 程富东, 戴全厚. 喀斯特坡耕地微地貌土壤养分空间变异性研究[J]. 中国水土保持, 2016, (1): 51-54. [Cheng F D, Dai Q H. Spatial variability of micro-geomorphology soil nutrient of slope farmland in Karst Area[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2016, (1): 51-54.]

## Extraction of positive and negative terrain boundary in Karst region of Southwest China

LI Jingxin<sup>1,2</sup>, XU Erqi<sup>2</sup>

(1. School of Nature Conversation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Southwest China has the largest continuous distribution of Karst in the world, which is mainly characterized by a positive terrain of peak-cluster and negative terrain depression. Affected by human production activities, the degree of Karst rocky desertification in positive terrain is now serious. Ecological restoration in these areas must be given high priority, so the division of positive and negative terrain is especially important. In this paper, seven typical terrain areas and three terrain factors including openness, curvature and relief amplitude based on a digital elevation model were selected. Then, average local variance was improved and used to calculate the openness difference binary image through threshold segmentation to obtain a boundary of positive and negative terrain with the reference of other two factors. The results showed that the optimal threshold was between -2 to -4 degrees and the positive terrain proportion was 42.80%~75.57%. To describe the morphological differences in positive and negative terrain, three landscape pattern indices were chosen. Taking the slope gradient distribution of slope land in positive terrain areas as an example, morphological difference was described between positive and negative terrain. In future, two aspects may attract attentions: one is the fusion of different terrain factors on quantifying accuracy of surface description and the other is combination of geomorphic morphological methods and computer automatic extraction, such as edge detection.

**Key words:** positive and negative terrain; Karst of Southwest China; openness; curvature; relief amplitude; threshold segmentation; slope land