

# 喀斯特山区地形起伏度及其对水土流失敏感性的影响

## ——以贵州省荔波县为例

谭玮颐<sup>1,2</sup>, 周忠发<sup>1,3</sup>, 朱昌丽<sup>1,2</sup>, 马国璇<sup>1,3</sup>

(1. 贵州师范大学 喀斯特研究院/地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550001; 2. 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵州 贵阳 550001; 3. 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550001)

**摘要:** [目的] 探究喀斯特高原山区水土流失的特征与空间变化规律, 为制定符合喀斯特山地环境的水土流失防治对策提供科学依据。[方法] 以典型喀斯特山区重点生态功能区贵州省荔波县为研究区, 综合运用地理空间分析方法, 确定提取地形起伏度最佳的分析单元, 结合水土流失敏感性评价, 分析地形起伏度与水土流失敏感性的空间分布规律及其相互关系。[结果] 基于 10 m 空间分辨率 DEM 数据, 提取地形起伏度的最佳网格大小为 54×54, 地形起伏度(RDLS)在 0.32~2.12 之间; 荔波县水土流失敏感主要为微度侵蚀, 占县域总面积达 88.40%; 水土流失敏感性区域主要集中在 RDLS 为 0.7~1.7 的分级范围内, RDLS 在 1~1.5 区间对水土流失的响应最敏感, 为水土流失敏感性的优势因子区间。[结论] 研究区内 RDLS 与不同敏感度的水土流失分布具有一定的一致性, 总体上水土流失受地形起伏度变化的影响显著。

**关键词:** 喀斯特山区; 地形起伏度; 最佳分析窗口; 水土流失敏感性; 荔波县

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)06-0077-07

中图分类号: S157.1, P283.7

**文献参数:** 谭玮颐, 周忠发, 朱昌丽, 等. 喀斯特山区地形起伏度及其对水土流失敏感性的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39(6): 77-83. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.06.011; Tan Weiyi, Zhou Zhongfa, Zhu Changli, et al. Topographic relief and its influence on soil erosion sensitivity in karst mountain area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(6): 77-83.

## Topographic Relief and Its Influence on Soil Erosion Sensitivity in Karst Mountain Area

—Taking Libo County, Guizhou Province as an Example

Tan Weiyi<sup>1,2</sup>, Zhou Zhongfa<sup>1,3</sup>, Zhu Changli<sup>1,2</sup>, Ma Guoxuan<sup>1,3</sup>

(1. School of Karst Science/School of Geography & Environmental Science, Guizhou

Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China; 2. The State Key Laboratory Incubation

Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang, Guizhou 550001, China;

3. State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang, Guizhou 550001, China)

**Abstract:** [Objective] The characteristics and spatial variation of soil erosion in karst plateau mountainous areas were investigated, in order to provide scientific basis for the prevention and control of soil erosion in accordance with the environment of karst mountainous areas. [Methods] Libo County of Guizhou Province, a key ecological function area in typical karst mountainous area, was taken as the research area. The spatial distribution of topographic relief and soil erosion sensitivity and their relationship were analysed by ggeospatial analysis method, to determine the best analysis unit for extracting topographic fluctuation degree, and the evaluation method of soil erosion sensitivity. [Results] Based on DEM data with 10 m spatial resolution, the optimal grid size for extracting topographic relief was 54×54, and relief degree of land surface(RDLS) was between 0.32 and 2.12. The sensitivity of soil erosion in Libo County was mainly slight erosion, which accounted for 88.40% of the total area of the county. In addition, the sensitive area of soil erosion was mainly

收稿日期: 2019-05-05

修回日期: 2019-07-03

资助项目: 国家自然科学基金地区项目“喀斯特石漠化地区生态资产与区域贫困耦合机制研究”(41661088); 贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2017]5726-57); 贵州省高层次创新型人才培养计划—“百”层次人才项目(黔科合平台人才[2016]5674)

第一作者: 谭玮颐(1992—), 女(布依族), 贵州省贵阳市人, 硕士研究生, 研究方向为地理信息系统与遥感。E-mail: ichtuy@163.com。

通讯作者: 周忠发(1969—), 男(汉族), 贵州省遵义市人, 教授, 博士生导师, 主要从事 GIS 与遥感、喀斯特资源与环境研究。E-mail: fa6897@163.com。

concentrated in the RDLS range of 0.7~1.7. The RDLS ranged from 1 to 1.5 was the most sensitive response to soil erosion, and thus the dominant factor range of soil erosion sensitivity. [Conclusion] The distribution of RDLS in the study area was consistent with that of soil erosion with different sensitivities. Generally, soil erosion was significantly affected by the change of topographic relief.

**Keywords:** karst mountain area; topographic relief; optimal analysis window; soil erosion sensitivity; Libo County

中国南方喀斯特山地崎岖,地形破碎,地貌类型影响了自然生态环境的特征,从宏观上控制了区域地表径流与冲刷的基本驱动力,具有水土易流易失的重要特征<sup>[1]</sup>。水土的流失导致了土壤耕作层被侵蚀,产生了区域土地退化、生产力降低等问题,导致干旱及洪涝发生,降低水利工程效益,严重影响喀斯特山区的生产生活,威胁下游河道安全<sup>[2]</sup>。从自然环境的角度来讲,土壤水分供应、浅层土壤水分、土壤保水能力、土壤需水量均和地形因子息息相关<sup>[3]</sup>,地形起伏度也是影响潜在水土流失的地形因子的重要指标<sup>[4]</sup>。当前,国内外学者<sup>[5-6]</sup>通过数字地形分析对人口分布、生态系统服务价值等相关现象开展了探索。与此同时,地形起伏度在地貌分类、生态环境评价、人口分布评价、土壤侵蚀敏感性评价方面也得到了广泛应用<sup>[7-10]</sup>。而区域地形起伏度的提取具有尺度依赖性<sup>[11]</sup>,地形起伏度与面积呈对数关系<sup>[12]</sup>,合适的分析尺度是决定喀斯特地区地形起伏度信息提取效果与有效性的关键<sup>[5,13]</sup>。贵州省荔波县作为水土保持型国家重点生态功能区承担着维护区域水土保持和生态环境安全的使命,因此,为准确反映典型喀斯特山区地表起伏的状况与水土流失特征,本文选取荔波县为研究区,以网格为研究尺度,通过有效提取 RDLS 和评价区域水土流失敏感性,揭示出 RDLS 对水土流失的影响,为认识喀斯特山区地形与水土流失的特征和分布规律,制定符合喀斯特山区的水土修复治理对策提供参考。

## 1 研究区概况

贵州省荔波县位于贵州省黔南布依族苗族自治州东南端,位于东经 107°37′—108°18′,北纬 25°7′—25°9′之间。属桂黔滇喀斯特石漠化防治区,水土保持型国家重点生态功能区,是珠江水系上游的重要安全屏障,也是“中国南方喀斯特”世界自然遗产地的核心地带<sup>[14]</sup>,作为世界上唯一分布集中、原生性强、相对稳定、地球同纬度上保存面积最大最完整的喀斯特地带,具有独特的锥状喀斯特地貌组合类型<sup>[15]</sup>,森林植被丰富度高。地处云贵高原岩溶向广西岩溶丘陵与孤峰岩溶平原过渡的岩溶斜坡地带<sup>[16]</sup>,生态区位重要,生态环境脆弱。是黔南州喀斯特较复杂、分布广、面积较大的山区之一,喀斯特面积占全县国土面

积的 74.4%。受地形的影响,平坝、山地水热资源分布不均匀,旱灾、暴雨、洪涝等自然灾害时有发生,水土流失与石漠化现象仍然突出,对保护区、遗产地和珍稀物种生存空间构成挤压和威胁<sup>[17]</sup>。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源及预处理

研究使用数据主要包括荔波县行政区划图,1:10 000 地形图,2015 年 Alos 影像。行政区划界线由荔波县行政区划图数字化获得;1:10 000 地形图主要用于生成数字高程模型 (DEM)。研究对 1:10 000 地形图矢量化处理,提取高程信息,通过 3 D Analyst 功能,生成空间分辨率为 10 m,高程范围为 320~1 480 m 的研究区 DEM 数据;通过研究区 DEM,结合荔波行政区划图,提取坡度、坡向、海拔和平地面积数据,获取地形起伏度;在 ENVI 平台中对遥感影像进行几何校正、增强、镶嵌、融合、裁剪等处理,融合后的影像空间分辨率为 3 m,实现影像内容与地物匹配,进行土地利用及植被覆盖度的提取;运用土地生态类型、坡度、植被覆盖度指标等数据,根据《土壤侵蚀分级分类标准 (SL190-2007 修订标准)》<sup>[17]</sup>,划分出水土流失敏感性等级,得到荔波县水土流失敏感性空间分布状况。

### 2.2 研究方法

2.2.1 最佳统计单元分析 在复杂的喀斯特地貌形态下,针对地形区与数据类型的不同,合理选取邻域分析网络的类型和大小才能恰当地反映出地形起伏度变化情况<sup>[19]</sup>。为确定荔波县 10 m 空间分辨率 DEM 的最佳分析网格单元,利用 ArcGIS 软件中空间分析模块中的邻域分析工具,选取矩形窗口,依次提取 2×2,3×3,4×4,⋯,70×70 网格大小下栅格邻域海拔的极值,并对各分析窗口下单位面积平均起伏度进行计算。

根据地形起伏度的定义和地貌发育理论<sup>[20]</sup>,定义刚好到达该稳定状态的点为“拐点”,该点对应的窗口值即可确定最佳统计单元的面积,而统计学中的均值变点分析法对恰有一个变点的检验最为客观有效<sup>[21-22]</sup>。因此研究采用均值变点分析法来确定研究区地形起伏度的最佳计算尺度,计算步骤为:

(1) 首先将各分析窗口下单位面积上的平均起

起伏度作为输入数据,计算单位地势起伏度序列  $T$ 。

$$T_i = t_i / s_i \quad (t=2,3,4,\dots,69,70) \quad (1)$$

式中: $T_i$ ,  $t_i$ ,  $s_i$ ——分析窗口下的单位起伏度、平均起伏度(m)、窗口面积( $m^2$ );  $t$ ——窗口数量。

(2) 对序列  $T_i$  取对数  $\ln(T_i)$ , 得到序列  $\{X_i\}$ 。

(3) 令  $i=2, \dots, n$ , 对每个  $i$  样本分为  $\{X_1, X_2, \dots, X_{i-1}\}$  和  $\{X_i, X_{i+1}, \dots, X_n\}$  两个序列段。然后计算每段样本序列的算术平均值( $\overline{X_{i1}}$ )和( $\overline{X_{i2}}$ )以及统计量  $S_i$ :

$$S_i = \sum_{t=1}^{i-1} (X_t - \overline{X_{i1}})^2 + \sum_{t=i}^{70} (X_t - \overline{X_{i2}})^2 \quad (2)$$

(4) 计算  $S$  与  $S_i$  的差值  $\Delta S$ :

$$\Delta S = S - S_i \quad (i=2,3,4,\dots,70) \quad (3)$$

2.2.2 地形起伏度(RDLS)提取 RDLS是地形起伏度的缩写,源于1948年苏联科学地理研究所提出的切割深度<sup>[23]</sup>,在地形复杂区域有较好的适用性<sup>[24]</sup>。封志明<sup>[5]</sup>将中国基准山体海拔高度视为500m,使地形起伏度作为独立数值具备了地理学意义。研究探讨地形起伏度与区域水土流失状况的关系,考虑喀斯特山区的地形条件,通过借鉴封志明对地形起伏度的提取方法,将地形起伏度定义为综合了平均海拔、相对高程、平地面积等多种单项地形要素基础上建立的函数:

$$RDLS = \{[\text{MAX}(H) - \text{MIN}(H)] \times [1 - P(A)/A]\} / 500 \quad (4)$$

式中: $\text{max}(H)$ ,  $\text{min}(H)$ ——区域内的最高和最低海拔(m);  $P(A)$ ——区域内平地面积( $km^2$ );  $A$ ——研究区域总面积( $m^2$ ); RDLS——地形起伏度。考虑到研究是基于  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  栅格数据对 RDLS 进行提取,参照相关文献<sup>[25-26]</sup>及荔波县喀斯特地貌,研究将坡度小于  $5^\circ$  的区域定义为平地。

2.2.3 水土流失敏感性因子提取 水土流失敏感性评价主要参考王娇、孙小涛等人的研究方法<sup>[27-28]</sup>,为保证等级判定的准确,根据相关国家水利行业标准<sup>[17-29]</sup>,结合喀斯特山区实际情况,将土地利用、高程、坡度和植被覆盖作为水土流失敏感性评价的指标因子,通过空间叠加分析,确定研究区水土流失敏感性空间分布情况。

① 土地利用因子。运用 ENVI 和 ArcGIS 软件平台进行荔波县土地利用监督分类与分类后处理,根据喀斯特地区土地资源主要利用方式,结合荔波土地覆盖特征,通过影像判读、解译,共将此次研究土地利用类型分为 8 类,分别为旱地、水田、有林地、灌木林地、其他林地、天然草地、水域和建设用地,按照全国土壤侵蚀遥感调查工作技术细则的标准对不同土地

利用类型下水土流失强度影响进行分级。

② 高程和坡度因子。以荔波县的数字高程模型为基础,利用 ArcGIS 软件空间分析模块获取荔波县高程和坡度数据。根据水土流失敏感性强度分级标准<sup>[17,29]</sup>,将荔波县坡度分为  $0^\circ \sim 5^\circ$ ,  $5^\circ \sim 8^\circ$ ,  $8^\circ \sim 15^\circ$ ,  $15^\circ \sim 25^\circ$ ,  $25^\circ \sim 35^\circ$  和  $>35^\circ$  的 6 个等级。

③ 植被覆盖度因子。选用线性混合像元分解模型中易操作且精度较高的 NDVI 像元二分模型进行植被覆盖度的估算<sup>[30]</sup>。通过 ENVI 中 BandMath 工具进行估算,计算公式为:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (5)$$

式中:NDVI——归一化植被指数; NIR——影像近红外波段; RED——红外波段。

估算植被覆盖度 FVC,计算公式为:

$$FVC = (NDVI - NDVI_{\text{soil}}) / (NDVI_{\text{veg}} - NDVI_{\text{soil}}) \quad (6)$$

式中:NDVI<sub>veg</sub>——完全植被覆盖地表的 NDVI; NDVI<sub>soil</sub>——无植被覆盖地表的 NDVI。根据相关研究<sup>[17,29]</sup>,分别取累计频率在 5% 与 95% 上的值;结合荔波县实际情况与水土流失敏感性强度分级标准,将植被覆盖度划分为  $<0.3$ ,  $0.3 \sim 0.45$ ,  $0.45 \sim 0.6$ ,  $0.6 \sim 0.75$  与  $>0.75$  的 5 个等级。

## 3 结果与分析

### 3.1 最佳分析窗口确定

利用邻域分析计算网格单元  $n \times n$  与地形起伏度的关系,结果详见表 1。

表 1 邻域分析窗口与平均地形起伏度对应关系

网格大小	面积/ $10^2\text{ m}^2$	平均地形 起伏度/m	样本序 列号 $i$
2×2	4	5.917	0
3×3	9	11.759	1
4×4	16	17.506	2
5×5	25	23.143	3
...	...	...	...
20×20	400	91.707	18
21×21	441	94.162	19
22×22	484	97.513	20
23×23	529	100.765	21
24×24	576	103.923	22
...	...	...	...
51×51	2 601	166.088	48
52×52	2 704	167.834	49
53×53	2 809	173.135	50
54×54	2 916	171.248	51
55×55	3 025	172.918	52
...	...	...	...
70×70	4 900	195.432	68

利用 SPSS 软件对表 1 中的邻域窗口面积与平均起伏度进行对数方程拟合(图 1)。拟合方程  $y = 3.934 + 4.754x - 0.30x^2$ , 拟合度  $R^2$  可达 0.997, 拟合效果较好。可知在邻域分析网格大小  $20 \times 20$  之前, 平均地形起伏度随网格面积同步增加的幅度较大; 在网格大小  $20 \times 20 \sim 55 \times 55$  间, 曲线出现了平均地形起伏度增加由陡变缓的点; 网格大小  $55 \times 55$  之后, 随着窗口面积的增大, 平均地形起伏度随网格面积变化趋于平缓。为找出不同分析原始样本的离差平方和  $S$  与样本分段后的统计量  $S_i$  间差值达到最大对应的点。根据公式(1)~(3)运用均值变点统计出  $S$  值为 58.713,  $S_i$  与  $\Delta S$  值详见表 2,  $\Delta S$  随窗口大小的变化情况如图 2 所示。

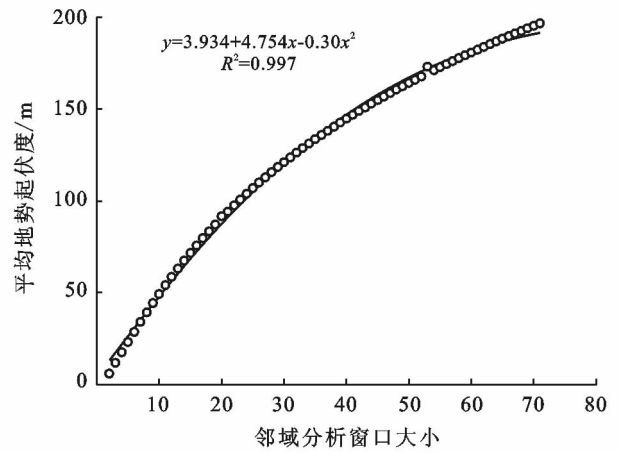


图 1 分析窗口与平均地形起伏度对应关系

表 2 均值变点分析值的统计

$S_i$	$\Delta S$	归一化	$i$	$S_i$	$\Delta S$	归一化	$i$
5.622	53.090	0.000 0	1	1.355	57.357	0.988 1	30
4.892	53.820	0.169 1	2	1.344	57.369	0.990 7	31
4.306	54.407	0.304 8	3	1.334	57.378	0.992 9	32
3.876	54.836	0.404 4	4	1.326	57.386	0.994 7	33
...	...	...	...	...	...	...	...
2.595	56.117	0.700 9	9	1.305	57.408	0.999 8	39
2.439	56.274	0.737 1	10	1.305	57.408	0.999 8	40
2.303	56.410	0.768 7	11	1.305	57.407	0.999 6	41
2.183	56.530	0.796 4	12	1.307	57.406	0.999 3	42
2.077	56.635	0.820 8	13	1.309	57.404	0.998 8	43
...	...	...	...	...	...	...	...
1.636	57.077	0.923 1	19	1.333	57.380	0.993 3	49
1.608	57.104	0.929 4	20	1.338	57.374	0.992 0	50
1.567	57.145	0.939 0	21	1.354	57.358	0.988 3	51
1.531	57.182	0.947 5	22	1.304	57.409	1.000 0	52
1.498	57.215	0.955 0	23	1.359	57.354	0.987 3	53
...	...	...	...	...	...	...	...
1.368	57.344	0.985 0	29	1.481	57.231	0.958 8	68

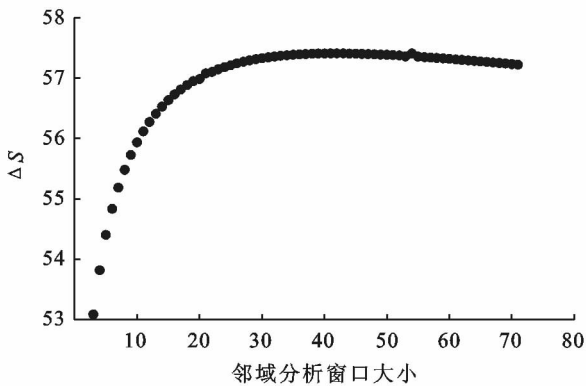


图 2 分析窗口与  $\Delta S$  变化曲线

从表 2 和图 2 可知,  $\Delta S$  在序列号为 52 时最大, 所对应的网格大小为 54, 即  $54 \times 54$  大小的网格为

陡变缓的点。据此, 可确定荔波县基于 10 m 空间分辨率时提取地形起伏度的最佳分析网格大小为  $54 \times 54$ , 统计面积为  $0.291 6 \text{ km}^2$ 。

### 3.2 地形起伏度与水土流失空间分布特征

研究使用的 DEM 分辨率较高, 荔波县面积仅  $2 431.8 \text{ km}^2$ , 属于典型小区域、较高分辨率条件下的地形起伏度研究。基于上述最佳分析单元  $54 \times 54$  的网格大小 ( $1.30 \times 10^5 \text{ m}^2$ ), 根据公式(4)计算荔波县 RDLS。从图 3 可以看出, 荔波县 RDLS 值介于 0.32 ~ 2.21 之间, 平均值为 1.12。

由图 3 可知, 荔波县 RDLS 空间分布整体趋势为东部高于西部, 南部高于北部。最高值 2.21 分布在东部立化村, 此地为水土保持与环境整治区; 高值分

布在东部海拔较高和峰丛洼地集中分布的区域;最低值 0.32 分布在樟江两岸河谷区,由此处向两侧逐渐升高;西北部甲良镇石漠化防治区与境内海拔较低的非喀斯特地区为次低值区域。由图 4 可知荔波县 RDLS 以中高值为主,波段集分析表明县内 RDLS 均值为 1.12, RDLS 在 1~1.5 的区域占比最大(69.79%),当起伏度达到 1 时,累计频率达到 96.82%,当地形起伏度达到 1.5 时,累计频率超过 99.98%。

占县域总面积 2.15%,而强度区面积 19.56 km<sup>2</sup> 占县域总面积的 0.79%,主要分散分布在境内人类活动较多的区域、水系周围以及海拔较高坡度较陡的区域;极强度和剧烈区面积共为 9.67 km<sup>2</sup>,占县域总面积的 0.39%。主要分布在樟江和地莪河上游地区部分中、高山区,以及玉屏镇和朝阳镇中心。

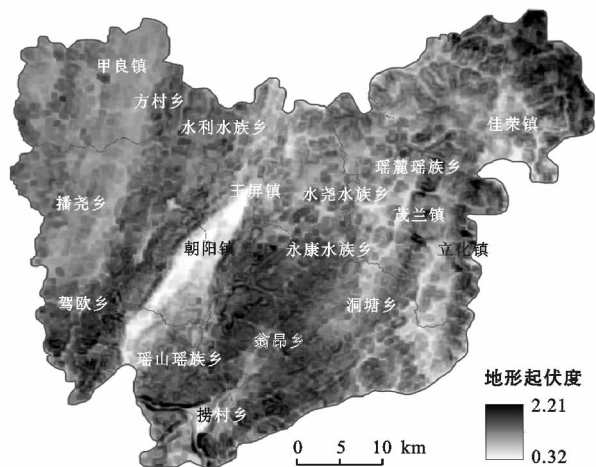


图 3 荔波县地形起伏度

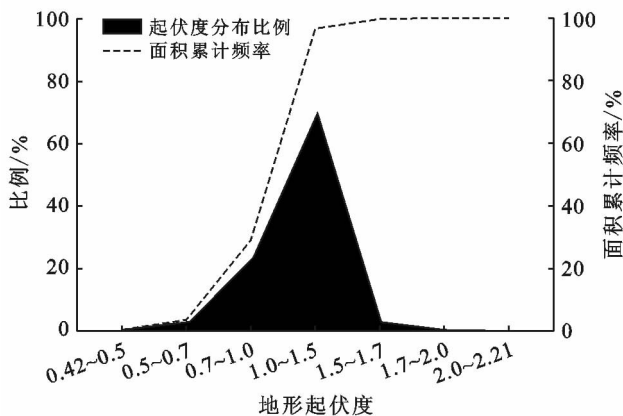


图 4 荔波县地形起伏度分布比例与面积累计频率

由荔波县土壤侵蚀水土流失敏感强度分级及面积统计数据(表 3)及水土流失敏感性空间分布图(图 5)可知,目前荔波县水土流失敏感性现状主要为微度,面积为 2 196.02 km<sup>2</sup>,占县域总面积的 88.40%,其中微度区主要分布在翁昂—永康—洞塘世界遗产保护区、茂兰自然保护区和部分植被覆盖较好的低山区;轻度面积 205.6 km<sup>2</sup>,占总面积的 8.28%,主要分布在水尧镇、地莪河下游和玉屏—朝阳—架欧—瑶山—捞村世界遗产保护区域内;中度区面积 53.38 km<sup>2</sup>,

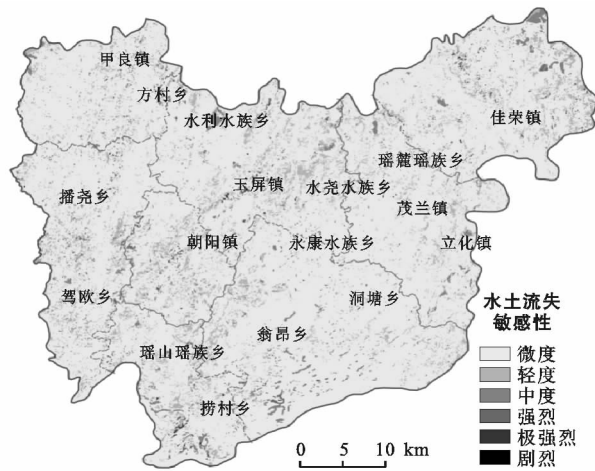


图 5 荔波县水土流失敏感性分布

表 3 荔波县水土流失敏感性基本特征

等级	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈
面积/km <sup>2</sup>	2 196.02	205.60	53.38	19.56	7.78	1.89
比例/%	88.40	8.28	2.15	0.79	0.31	0.08

### 3.3 地形起伏度对水土流失敏感性的影响

RDLS 是评价水土流失敏感性的重要宏观地形指标。由图 3 和图 5 可看出, RDLS 与水土流失敏感性分布范围具有一定的一致性和规律性, 水土流失敏感性高的区域 RDLS 多在 1.5~2.21, 总体分布在峰丛发育广泛地区及境内最高点的西北部。中部河谷和非喀斯特地带水土流失敏感性较低, RDLS 为 0.32

~1.5。总体表现为水土流失敏感性随 RDLS 的下降而减少。当 RDLS 位于 0~0.5 时, 水土流失敏感性下降较剧烈; 当 RDLS 位于 0.5~1 时, 水土流失敏感性下降较缓慢; 当 RDLS 位于 1~2 时, 及 RDLS > 2 时, 水土流失敏感性上升较剧烈。为探究研究区水土流失敏感性在不同起伏度下的分布特征, 采用地理信息系统空间分析技术, 将水土流失敏感性评价图按

10×10 的栅格大小转换为 Gird, 将荔波县 RDLS 与水土流失敏感性栅格数据的行列号和空间参考系统进行统一, 运用面积制表工具对两个数据层的交集进行统计, 结果详见表 4。

从表 4 与图 6 中可看出, 各等级水土流失敏感性所占的面积比在 RDLS 等级 0.32~0.5, 0.5~0.7, 0.7~1, 1~1.5 下, 呈逐渐上升趋势, 并在等级 1~1.5 处达到峰值。之后随着 RDLS 的增加, 各等级水土流失敏感性所占的面积比均不断降低。这表明, 荔波县水土流失敏感区主要分布在 RDLS 等级为 1~1.5 的区域, 在该区域水土流失受地形起伏度变化的影响最为显著。此外, 荔波县 0.32~0.5, 0.5~0.7 等级 RDLS 的区域占荔波县全域面积仅 0.43% 和 2.94%, RDLS 等级 0.7~1 区域面积占比则可达 23.68%; 而 1~1.5 等级 RDLS 的区域占荔波县全域

面积可高达 69.85%, 进一步说明荔波县水土流失敏感区域分布在 1~1.5 等级 RDLS 范围内。相应的, 轻度以上水土流失敏感性区域主要分布在地形起伏度 0.7~1, 1~1.5, 1.5~1.7 范围内; 而起伏度在半个基准山体(0.5)以下的范围不存在剧烈水土流失敏感区域; 地形起伏度范围为 2~2.204 时微度水土流失敏感区域占比最小; 由于地形起伏度高的区域, 植被覆盖度低、基岩露率高, 雨水冲刷作用强烈, 已濒临无土可流失, 故水土流失敏感性偏小。由此表明, RDLS 基本能够反映喀斯特地区地形起伏状况, 同时能准确反映水土流失敏感性特征, 是影响水土流失分布的主要因素之一。综上所述, 荔波县地形起伏度在 0.7~1.7 的玉屏镇、朝阳镇、小七孔镇和瑶山瑶族乡等地, 水土流失的敏感性最高, 这些区域应作为荔波水土保持重点生态功能区水土流失综合防治的核心区域。

表 4 不同地形起伏度下水土流失敏感度分布

水土流失 敏感度	地形起伏度等级						
	0.32~0.5	0.5~0.7	0.7~1	1~1.5	1.5~1.7	1.7~2	2~2.21
微度/km <sup>2</sup>	990.52	6 392.51	52 389.49	154 332.86	6 092.42	648.96	22.6
轻度/km <sup>2</sup>	55.77	568.74	4 641.57	14 270.6	807.4	113.71	0.62
中度/km <sup>2</sup>	19.24	227.51	1 017.59	2 850.27	104.54	9.34	3.5
强烈/km <sup>2</sup>	2.02	55.73	448.38	1 312.45	42.31	10.67	0.33
极强烈/km <sup>2</sup>	6.29	46.25	252.17	444.95	19.28	1.19	0
剧烈/km <sup>2</sup>	0	4.66	31.49	147.03	5.06	0.46	0.16
占比/%	0.43%	2.94%	23.68%	69.85%	2.85%	0.32%	0.01%

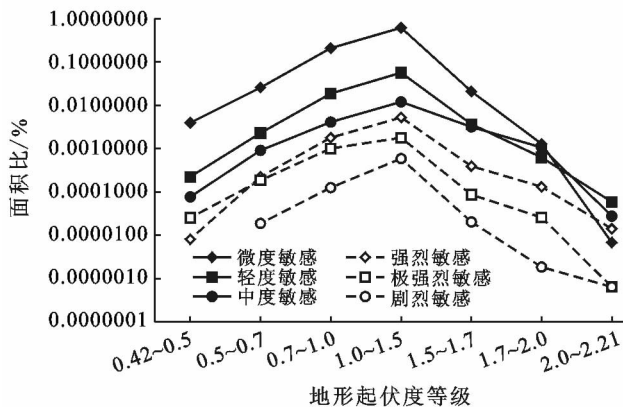


图 6 水土流失敏感强度地形起伏度分布特征

## 4 讨论与结论

(1) 研究对典型地形复杂小区域、较高分辨率条件下的地形起伏度提取进行研究。基于 DEM 数据为 10 m 空间分辨率提取地形起伏度时, 最佳分析网格大小为 54×54, 统计面积为 0.29 km<sup>2</sup>。在峰丛普遍发育的荔波县境内, RDLS 介于 0.32~2.21 之间, 均值为 1.12, 起伏度在 1~1.5 的区域占比最大, 为

69.79%, RDLS 可以较好地反映喀斯特山区的地形地貌特征。

(2) 荔波县水土流失现状主要为微度侵蚀, 占县域总面积达 88.40%, 其次为轻度、中度、极强烈和剧烈, 分别占县域总面积的 8.28%, 2.15%, 0.79%, 0.3% 和 0.08%。呈现出微度水土流失敏感区域连片分布外, 其他等级主要呈点状零散分布的空间特征, 从各等级面积可以看出荔波县水土流失比较敏感, 尤其以轻度和中度水土流失为主, 整体处于可控阶段。

(3) 研究区 RDLS 和水土流失敏感性等级之间存在显著关系, 轻度以上敏感区域面积出现先增大后减小的单峰分布, 区内 RDLS 因子层中地形起伏度 0.7~1.7 的分级范围为水土流失的敏感区域, 而其中 1~1.5 区间的值最大, 为水土流失敏感性的优势因子区间, 对水土流失的响应最敏感, 此范围应作为今后荔波水土保持重点生态功能区水土流失综合防治的核心地带, 同时对其他区域也应给予重视。

研究结果表明, RDLS 研究对喀斯特地区水土流失分析评价具有重要意义, 能够作为喀斯特山区水土

流失评价中的重要指标。水土流失具有地貌特征,地表的起伏影响流水冲刷和土壤堆积。地形起伏度是影响水土流失分布的一个主要因素,总体趋势上,荔波县的地形起伏度影响着水土流失敏感性的分布。同时宏观地形起伏度只是影响因素之一,区域的植被覆盖情况、降水状况、耕作技术、水土保持措施和喀斯特山区地下孔隙、裂隙等因素也会严重影响区域的水土流失。荔波县作为珠江上游生态安全屏障和水土保持型国家重点生态功能区,应继续加强自然保护区与遗产地的保护,以生态修复为核心,因地制宜优化空间资源配置,进一步强水利化程度,遏制水土流失的形成,更好地保护当地生态环境,为喀斯特山区提供可借鉴的水土流失防治经验。

### [参 考 文 献]

- [1] 熊康宁,李晋,龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J]. 地理学报,2012,67(7):878-888.
- [2] 戴全厚,严友进. 西南喀斯特石漠化与水土流失研究进展[J]. 水土保持学报,2018,32(2):1-10.
- [3] 刘鑫,毕华兴,李笑吟,等. 晋西黄土区基于地形因子的土壤水分分异规律研究[J]. 土壤学报,2007,44(3):411-417.
- [4] 刘新华,杨勤科,汤国安. 中国地形起伏度的提取及在水土流失定量评价中的应用[J]. 水土保持通报,2001,21(1):57-59.
- [5] 封志明,张丹,杨艳昭. 中国地形起伏度及其与人口分布的相关性[J]. 地理学报,2007,74(10):1073-1082.
- [6] 郭晓娜,苏维词,李强,等. 三峡库区(重庆段)地表起伏度及其对生态系统服务价值的影响[J]. 生态与农村环境学报,2016,32(6):887-894.
- [7] 程维明,周成虎,柴慧霞,等. 中国陆地地貌基本形态类型定量提取与分析[J]. 地球信息科学学报,2009,11(6):725-736.
- [8] 谭学玲,闫庆武,李晶晶,等. 盘县农村居民点空间分布特征及其地形地貌影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境,2017,26(12):2083-2090.
- [9] Saha A K, Gupta R P, Sarkar I, et al. An approach for GIS-based statistical landslide susceptibility zonation: With a case study in the Himalayas [J]. Landslides, 2005,2(1):61-69.
- [10] 舒天竹,王晓红. 基于3S技术的地形起伏度与区域土壤侵蚀的相关性研究[J]. 水土保持研究,2017,24(4):127-132.
- [11] 张静静,朱文博,朱连奇,等. 基于栅格的豫西山区地形起伏特征及其对人口和经济的影响[J]. 地理学报,2018,73(6):109-122.
- [12] Tan D K P, Sun H, Lu Y, et al. Passive radar using global system for mobile communication signal: theory, implementation and measurements [J]. IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 2005,152(3):116-123.
- [13] 王让虎,张树文,蒲罗曼,等. 基于 ASTER GDEM 和均值变点分析的中国东北地形起伏度研究[J]. 干旱区资源与环境,2016,30(6):49-54.
- [14] 陈品冬,熊康宁,肖时珍. 中国荔波锥状喀斯特世界自然遗产价值全球对比分析[J]. 地理研究,2013,32(8):1517-1527.
- [15] 张美良,林玉石,冉景丞,等. 贵州荔波岩溶洞穴发育特征[J]. 中国岩溶,2000(1):13-20.
- [16] 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.
- [17] SL190-2007,土壤侵蚀分级分类标准[S]. 北京:中国水利水电出版社,2008.
- [18] 贺丹. 不同分辨率 DEM 提取地形因子的适宜分析窗口研究[D]. 陕西 西安:西北大学,2012.
- [19] 王志恒,胡卓玮,赵文吉,等. 应用累积和分析算法的地形起伏度最佳统计单元确定[J]. 测绘科学,2014,39(6):59-64.
- [20] 项静恬,史久恩. 非线性系统中数据处理的统计方法[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [21] 韩海辉,高婷,易欢,等. 基于变点分析法提取地势起伏度:以青藏高原为例[J]. 地理科学,2012,32(1):101-104.
- [22] 蒋好忱,杨勤科. 基于 DEM 的地形起伏度算法的比较研究[J]. 水土保持通报,2014,34(6):162-166.
- [23] 斯皮里顿诺夫. 地貌制图学[M]. 北京:地质出版社,1956.
- [24] 周自翔,李晶,任志远. 基于 GIS 的关中一天水经济区地形起伏度与人口分布研究[J]. 地理科学,2012,32(8):951-957.
- [25] 郝慧梅,任志远. 基于栅格数据的陕西省人居环境自然适宜性测评[J]. 地理学报,2009,64(4):498-506.
- [26] 李阳兵,邵景安,王世杰,等. 基于岩溶生态系统特性的水土流失敏感性评价[J]. 山地学报,2007,25(6):671-677.
- [27] 王娇,程维明,祁生林,等. 基于 USLE 和 GIS 的水土流失敏感性空间分析:以河北太行山区为例[J]. 地理研究,2014,33(4):614-624.
- [28] 孙小涛,周忠发,陈全,等. 重点生态功能区水土流失敏感性评价与分布研究:以贵州省雷山县为例[J]. 水土保持学报,2016,30(6):73-78.
- [29] SL461-2009,岩溶地区水土流失综合治理技术标准[S]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- [30] 魏石磊,翟亮,桑会勇,等. 像元分解模型的植被覆盖度遥感估算[J]. 测绘科学,2016,41(1):139-143.