

基于 3S 技术的地形起伏度与区域土壤侵蚀的相关性研究

舒天竹, 王晓红

(贵州大学 林学院, 贵阳 550025)

摘 要:地形起伏度直接影响着地面的径流变化,是导致土壤侵蚀的主要根源之一。分析两者相关性的前提是准确提取地形起伏度,而确定研究数据尺度下地形起伏度的最佳分析窗口是得出可靠结果的保障。在 3S 技术的支持下,运用均值变点法分析罗甸县基于 DEM(空间分辨率为 30 m×30 m)的最佳分析窗口,并依据 2007 年修正的土壤侵蚀分类分级标准估算研究区各样本单元的土壤侵蚀量,对两者进行相关性分析。结果表明:罗甸县在该尺度数据源下的最佳分析窗口为 32×32,最佳统计面积为 0.921 6 km²,实证了均值变点分析方法提取地形最佳分析窗口的可行性;地形起伏度与区域土壤侵蚀模数的相关系数为 0.519 1,充分说明了作为宏观地形因子之一的地形起伏度是区域土壤侵蚀的主导因素之一。

关键词:地形起伏度;土壤侵蚀;均值变点法;3S 技术

中图分类号:S157.1;P208

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)04-0127-06

Research for the Correlation Between Relief Amplitude and Regional Soil Erosion Based on 3S Technology

SHU Tianzhu, WANG Xiaohong

(College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Relief amplitude directly affects the runoff variation of the earth surface, thus, it is one of the main causes of soil erosion. The premise of analysis the relativity between relief amplitude and soil erosion is to determine the best analysis window under the scale data to extract the relief amplitude. In this paper, we analyzed the best analysis window which resulted from DEM (30 × 30 resolution) of Luodian County in Guizhou Province through a method of mean change-point under the support of 3S technology. And according to the modified classification criteria of soil erosion in 2007, we estimated the soil erosion amount of each sample unit in study area. Finally, we analyzed the relativity between relief amplitude and regional soil erosion. The results show that the best analysis window under the scale data in Luodian County is 32 × 32, and the best statistical area is 0.921 6 km², which effectively proves that using the mean change point analysis method for extracting the relief amplitude was feasible. Furthermore, the obtained correlation coefficient between relief amplitude and regional soil erosion modulus in Luodian County is 0.5191, fully illustrating that relief amplitude as one of macroscopic topographic factors is one of the dominant factors in regional soil erosion.

Keywords: relief amplitude; soil erosion; mean change-point analysis; 3S technology

土壤侵蚀,作为地球表面的一种自然现象,是指水土流失中土的损失,是在水力、风力、重力以及冻融等外营力的作用下,陆地表层的土壤、土壤母质及其他地面组成物质被破坏、剥蚀、转运、沉积的全过程。由此可见,土壤侵蚀是多因素共同作用的结果,主要分为自然因素(地形地貌、土壤类型、植被覆盖、降雨

多少等)和人为因素两大类。研究表明,在诸多因素中,对土壤侵蚀的影响作用尤为突出的是地形因子^[1]。在研究区域性的土壤侵蚀定性定量评价中,基于多空间尺度地形因子的适宜性选择、精确性提取以及针对性应用具有关键性作用。

地形因子是表征地球表面形态的指标,可分为微

收稿日期:2016-11-14

修回日期:2016-11-30

资助项目:贵州省科学技术资助项目(黔科合 J 字[2014]2070 号);贵州大学引进人才科研资助项目(贵大人基合字[2013]31 号);贵州省科技计划课题资助(黔科合 LH 字[2014]7649 号)

第一作者:舒天竹(1993—),女,布依族,贵州安顺人,在读硕士研究生,主要从事 3S 技术在水土保持中的应用研究。E-mail:408812692@qq.com

通信作者:王晓红(1970—),男,贵州修文人,博士,副教授,主要从事 3S 技术应用研究。E-mail:gzdxwxh@163.com

观地形因子,宏观地形因子和其他相关信息因子。其中,微观地形因子包括坡度、坡向、坡长、地面曲率等;宏观地形因子包括地形起伏度、地面粗糙度等,可描述一定区域范围内的地形特征;其他相关信息因子如太阳辐射通亮密度、太阳直接日辐射等,是前述多种因子通过函数组合的数学模型。

在已有的水土流失评价模型中,很多是借助坡度坡长因子进行评价的。 LS 因子属于微观地形因子,由其做出的评价更适用于微观尺度小区域范围的研究。不可否认, S 因子是微观尺度上评价水土流失的最佳指标。但在宏观尺度的大区域性研究中,随着地表信息载体(如 DEM)比例尺和分辨率的降低,如 LS 等的微观地形因子会失去土壤侵蚀和地貌学方面的意义。而诸如地形起伏度、地表粗糙度、地表切割深度、高程变异系数、河网密度、沟壑密度、侵蚀势能等地形指标在区域性的土壤侵蚀评价中都能做出宏观的分析。本文中,考虑到研究区域较大,地貌类型较为复杂,因此选择宏观地形因子中的地形起伏度作为研究对象。地形起伏度直接影响着地面的径流变化,是导致土壤侵蚀的主要根源之一。另外,在不同空间尺度信息转换图谱的技术支持下,地形起伏度最能直接同地面的实际地形特征建立对应量的转换关系^[2]。因此,研究中,主要分析基于数字高程模型(DEM),结合运用遥感影像处理平台 ENVI 5.1 及地理信息处理平台 ArcGIS 10.2,提取研究区的地形起伏度及其土壤侵蚀量,探讨两者之间的相关性。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

罗甸县地处东经 $106^{\circ}23'17''$ — $107^{\circ}4'6''$ 、北纬 $25^{\circ}3'49''$ — $25^{\circ}45'3''$,位于贵州省南部红水河畔,海拔 233~1 369 m,国土面积 3 002 km²。罗甸县辖 9 个乡镇,含 182 个村(社区)委会,总人口 34.5 万人。县境内山峦起伏、沟谷纵横、地面破碎,碳酸盐岩广布,占境内面积的 56.5%,喀斯特及其发育。气候属亚热带季风区,春早、夏长、秋迟、冬短。

1.2 数据收集

本文所用数据有 2014 年罗甸县 OLI 影像(空间分辨率为 30 m×30 m),1:50 000 地形图和行政区划图,以及研究区 DEM(空间分辨率为 30 m×30 m)。对影像进行几何校正、镶嵌、裁剪等预处理,再利用校正后的影像对地形图、区划图做地理配准,统一投影坐标为 D_WGS_1984 坐标系。

1.3 研究方法

1.3.1 邻域分析提取地形起伏度 所谓地形起伏

度,指的是在一个特定的区域内,最高点海拔与最低点海拔的差值。公式表达如式(1)所示:

$$\Delta H_i = H_{\max} - H_{\min} \quad (1)$$

式中: ΔH_i 表示以第 i 个栅格为中心的邻域范围内的相对高差,也即是该范围的地形起伏度; H_{\max} 为该邻域范围内的最大高程点; H_{\min} 为该邻域范围内的最小高程点。

地形起伏度可以利用研究区的数字高程模型(DEM)通过 ArcGIS 软件中的邻域分析模块快速提取出来,其提取关键在于“邻域范围”的确定,即是说分析窗口的最佳选择^[3-4]。

本研究中,利用 ArcGIS 10.2 软件中 Spatial Analyst Tools/Neighborhood/Focal Statistics/Range 工具,确定罗甸县 30 m×30 m 空间分辨率 DEM 的最佳分析窗口。窗口范围依次设定为 3×3, 4×4, 5×5, ..., 80×80, 移动步距为 1, 窗口类型为 Rectangle。然后逐一对各分析窗口下单位面积的平均起伏度进行计算,公式表达如式(2)所示:

$$\bar{H} = \frac{1}{N} \sum \Delta H_i \quad (2)$$

式中: \bar{H} 为对应分析窗口下罗甸县的平均起伏度; N 为栅格总数。

计算结果见表 1。 \bar{H} 反映了对应分析窗口下研究区的地形平均起伏状况。以分析窗口的面积为横坐标,对应分析窗口下的平均起伏度为纵坐标绘制变化曲线,见图 1。

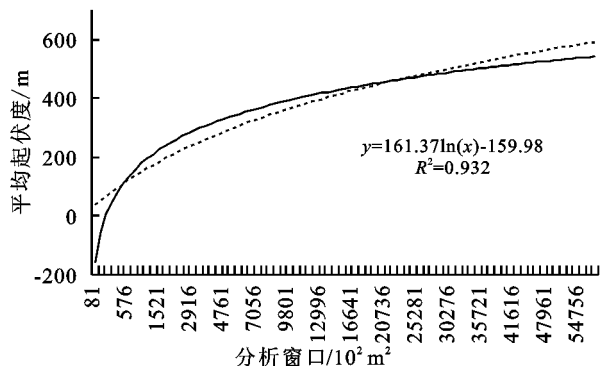


图1 窗口面积与平均起伏度关系的拟合曲线

由图 1 可见,起伏度随窗口面积的变化趋势呈对数曲线,通过 Excel 拟合,得到趋势线,表达式为 $y = 161.37\ln(x) - 159.98$,拟合优度为 0.932,效果良好。

随着分析窗口的增大,地形起伏度也随之增大,为更精确地表达该区域的宏观地面起伏状况,及其与土壤侵蚀的相关特征,确定一个适宜的分析窗口是提取算法的核心步骤,也是提取结果有效性的关键步骤。依照地貌发育理论,在任一地貌类型中,以某一单个山体上任意一点为圆心,随着该圆面积的扩大,

圆内最高点海拔与最低点海拔之差不断增加。最初,该圆仅涵盖山体的一部分,最高最低点的海拔之差以很高的速率增加;但当圆涵盖整个山体时,海拔差值增加到一定值;此时,再增大圆面积,海拔差值仅缓慢增加,亦即达到了一个趋于稳定的状态。定义刚好到达该稳定状态的点为“拐点”,该点对应的面积即为最佳统计面积。理论中,单个山体的统计单元即是该山体的水平投影面积,与山前基准相吻合。因此,统计单元内的海拔差值即地形起伏度,所反映山体的地势起伏符合山体完整性原则^[5]。即是说本研究中,在见图 1 所呈现的对数曲线上,存在唯一一个由陡变缓的拐点,该拐点即为提取该研究区地形起伏度的最佳分析窗口。

在数理统计方法中,均值变点法对恰有一个变点的检验最为有效,且处理对象可为离散型的非线性数据。计算步骤如下:

(1) 将研究区各设定窗口下的平均起伏度 \bar{H} 作为均值变点法的输入数据,记为 $\{\bar{H}_t, t=1, 2, 3, \dots, n\}$,在本研究中, $n=78$ 。

(2) 令 $i=2, 3, \dots, n$,对于每个 i ,将输入数据分为两段样本: $\bar{H}_1, \bar{H}_2, \dots, \bar{H}_{i-1}$ 和 $\bar{H}_i, \bar{H}_{i+1}, \dots, \bar{H}_n$ 。求取每段样本的算术平均值 \bar{H}_{i1} 和 \bar{H}_{i2} ,及整个输入数据的算术平均值 H :

$$\bar{H}_{i1} = \frac{1}{i-1} \sum_{t=1}^{i-1} \bar{H}_t \tag{3}$$

$$\bar{H}_{i2} = \frac{1}{n-i+1} \sum_{t=i}^n \bar{H}_t \tag{4}$$

$$H = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \bar{H}_t \tag{5}$$

(3) 计算每个 i 的统计量 S_i ,及整个输入数据的统计量 S :

$$S_i = \sum_{t=1}^{i-1} (\bar{H}_t - \bar{H}_{i1})^2 + \sum_{t=i}^n (\bar{H}_t - \bar{H}_{i2})^2 \tag{6}$$

$$S = \sum_{t=1}^n (\bar{H}_t - H)^2 \tag{7}$$

(4) 计算 $S-S_i$ 的值,并对其进行归一化处理,得到数据序列 X_i :

$$X_i = \frac{(S-S_i) - (S-S_i)_{\min}}{(S-S_i)_{\max} - (S-S_i)_{\min}} \tag{8}$$

1.3.2 土壤侵蚀计算各因子的提取 本研究依据 2007 年修正的土壤侵蚀分类分级标准(SL190—2007),考虑到贵州特殊的喀斯特地貌存在严重的且至今尚无法准确量测的大量地下漏蚀,呈现地表“无土可流”的现状,结合专家评估,根据图 2 所示的规程估算罗甸县 2014 年的土壤侵蚀模数。

微度对应侵蚀模数为 $50 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,轻度对应侵蚀模数为 $100 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,中度对应侵蚀模数为 $200 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,强烈对应侵蚀模数为 $500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,

极强烈对应侵蚀模数为 $1\,000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,剧烈对应侵蚀模数为 $1\,500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。

类型	地面坡度					
	<5°	5°~8°	8°~15°	15°~25°	25°~35°	>35°
非耕地的 林草覆盖/ %	微度					
	>75					
	60~75					
	45~60					
	30~45					
坡耕地	<30					
		轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈

图 2 土壤侵蚀强度分级标准

(1) 坡度因子的提取。在 ArcGIS 10.2 软件中,利用罗甸县的数字高程模型,通过空间分析模块中的地表分析工具生成研究区的坡度图层,并根据图 2 进行重分类。

(2) 土地利用类型因子的提取。根据研究区 2014 年的 OLI 影像,在 ENVI 5.1 软件中,综合运用监督分类和决策树分类将研究区的土地利用类型划分为:水体、建筑用地、灌草地、林地、非坡耕地和坡耕地。经过实地抽样调查验证,分类精度为 88.3%。

(3) 植被覆盖度因子的提取。在 ENVI 5.1 软件中,通过 Band Math 工具,运用遥感的方法对植被覆盖度进行估算。选用线性混合像元分解模型中最简便易行且精度也较高的 NDVI 像元二分模型进行植被覆盖度的估算^[6-7]。

基于研究区 2014 年的 OLI 影像,运用其红外波段和近红外波段根据式(9)估算研究区各像元的归一化植被指数 NDVI:

$$\text{DVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}} \tag{9}$$

式中:NIR 表示近红外波段;RED 表示红外波段。

然后,根据经验选取置信区间,确定 $\text{NDVI}_{\text{soil}}$ 和 NDVI_{veg} ,依照式(10)估算各像元的植被覆盖度 FVC:

$$\text{FVC} = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}}}{\text{NDVI}_{\text{veg}} - \text{NDVI}_{\text{soil}}} \tag{10}$$

最后依据图 2,在 ArcGIS 10.2 软件中进行植被覆盖度的重分类。

2 结果与分析

2.1 均值变点法确定最佳分析窗口

由 1.3.1 节中陈述的均值变点分析法得出的计算结果见表 1。运用均值变点法找到地形起伏度的最佳分析窗口,是由于该唯一拐点的存在会使输入数据的统计量 S 与分段样本的统计量 S_i 之间的差值达到最大。因此,由表 1 和图 3 可以找到罗甸县基于 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 空间分辨率 DEM 提取地形起伏度的最佳分析窗口是 32×32 ,统计面积为 $0.921\,6 \text{ km}^2$ 。

表 1 均值变点分析的统计结果

窗口 序列号 t	窗口 大小	窗口面积/ km ²	平均地形 起伏度/m	样本序 列号 i	归一化 值 X _i	窗口 序列号 t	窗口 大小	窗口面积/ km ²	平均地形 起伏度/m	样本序 列号 i	归一化 值 X _i
1	3×3	0.0081	37.12			40	42×42	1.5876	422.57	39	0.93092
2	4×4	0.0144	55.04	1	0.06420	41	43×43	1.6641	428.36	40	0.91810
3	5×5	0.0225	72.35	2	0.15368	42	44×44	1.7424	434.00	41	0.90436
4	6×6	0.0324	88.96	3	0.23624	43	45×45	1.8225	439.60	42	0.88974
5	7×7	0.0441	104.84	4	0.31234	44	46×46	1.9044	445.06	43	0.87426
6	8×8	0.0576	120.00	5	0.38244	45	47×47	1.9881	450.48	44	0.85797
7	9×9	0.0729	134.47	6	0.44699	46	48×48	2.0736	455.77	45	0.84088
8	10×10	0.0900	148.30	7	0.50638	47	49×49	2.1609	461.03	46	0.82303
9	11×11	0.1089	161.54	8	0.56101	48	50×50	2.2500	466.16	47	0.80443
10	12×12	0.1296	174.23	9	0.61120	49	51×51	2.3409	471.27	48	0.78512
11	13×13	0.1521	186.44	10	0.65725	50	52×52	2.4336	476.24	49	0.76511
12	14×14	0.1764	198.17	11	0.69945	51	53×53	2.5281	481.20	50	0.74444
13	15×15	0.2025	209.50	12	0.73804	52	54×54	2.6244	486.03	51	0.72311
14	16×16	0.2304	220.42	13	0.77323	53	55×55	2.7225	490.85	52	0.70117
15	17×17	0.2601	231.00	14	0.80525	54	56×56	2.8224	495.54	53	0.67861
16	18×18	0.2916	241.23	15	0.83426	55	57×57	2.9241	500.21	54	0.65548
17	19×19	0.3249	251.17	16	0.86043	56	58×58	3.0276	504.76	55	0.63177
18	20×20	0.3600	260.79	17	0.88393	57	59×59	3.1329	509.30	56	0.60754
19	21×21	0.3969	270.16	18	0.90489	58	60×60	3.2400	513.72	57	0.58276
20	22×22	0.4356	279.24	19	0.92345	59	61×61	3.3489	518.13	58	0.55750
21	23×23	0.4761	288.10	20	0.93973	60	62×62	3.4596	522.43	59	0.53173
22	24×24	0.5184	296.71	21	0.95384	61	63×63	3.5721	526.73	60	0.50550
23	25×25	0.5625	305.13	22	0.96589	62	64×64	3.6864	530.90	61	0.47880
24	26×26	0.6084	313.31	23	0.97597	63	65×65	3.8025	535.09	62	0.45168
25	27×27	0.6561	321.32	24	0.98418	64	66×66	3.9204	539.16	63	0.42411
26	28×28	0.7056	329.11	25	0.99060	65	67×67	4.0401	543.25	64	0.39614
27	29×29	0.7569	336.75	26	0.99532	66	68×68	4.1616	547.22	65	0.36776
28	30×30	0.8100	344.18	27	0.99841	67	69×69	4.2849	551.21	66	0.33900
29	31×31	0.8649	351.49	28	0.99996	68	70×70	4.4100	555.09	67	0.30986
30	32×32	0.9216	358.60	29	1.00000	69	71×71	4.5369	558.98	68	0.28035
31	33×33	0.9801	365.61	30	0.99863	70	72×72	4.6656	562.77	69	0.25049
32	34×34	1.0404	372.42	31	0.99588	71	73×73	4.7961	566.58	70	0.22028
33	35×35	1.1025	379.15	32	0.99183	72	74×74	4.9284	570.28	71	0.18974
34	36×36	1.1664	385.69	33	0.98651	73	75×75	5.0625	574.01	72	0.15888
35	37×37	1.2321	392.16	34	0.98000	74	76×76	5.1984	577.63	73	0.12769
36	38×38	1.2996	398.45	35	0.97232	75	77×77	5.3361	581.27	74	0.09621
37	39×39	1.3689	404.68	36	0.96354	76	78×78	5.4756	584.81	75	0.06442
38	40×40	1.4400	410.73	37	0.95367	77	79×79	5.6169	588.38	76	0.03236
39	41×41	1.5129	416.73	38	0.94280	78	80×80	5.7600	591.84	77	0.00000

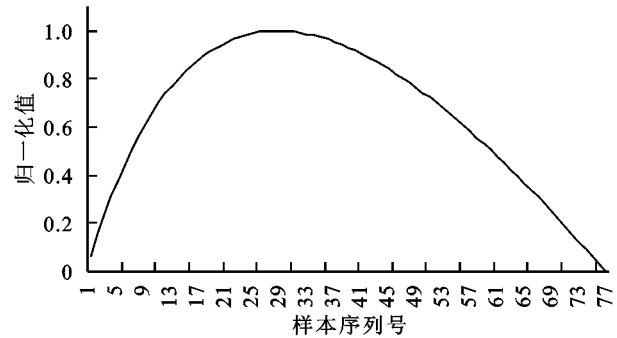


图 3 归一化值的变化曲线

在 ArcGIS 10.2 软件中,设置窗口范围为 32×32,提

取研究区的地形起伏度。参考中国陆地 1 : 100 万数字地貌制图规范中的标准,根据研究区实际的地形起伏将其分为 6 级:平原(≤30 m)、台地(30~70 m)、丘陵(70~200 m)、小起伏山地(200~500 m)、中起伏山地(500~1 000 m)和大起伏山地(1 000~2 500 m),结果见图 4。

2.2 研究区土壤侵蚀强度等级的提取

将 1.3.2 节中提取的各图层依照图 2 的逻辑关系进行叠置分析,并统计。在罗甸县的土地利用类型中,经过调查分析,将水体归为无土壤侵蚀强度类型,建设用地归为微度土壤侵蚀强度类型,其余四种地类依照图

2 进行归纳,得到罗甸县 2014 年土壤侵蚀强度空间分布图如图 5 所示,各强度的土壤侵蚀量化结果见表 2。

由表 2 可以计算得出,罗甸县的总土壤侵蚀模数为 202.00 t/(km²·a),总体属于中度侵蚀。

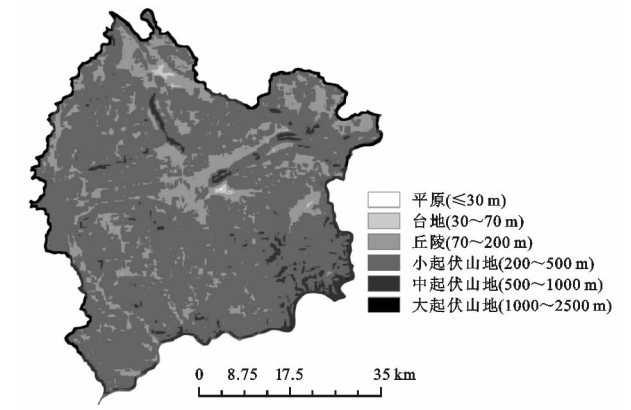


图 4 研究区地形起伏度分级

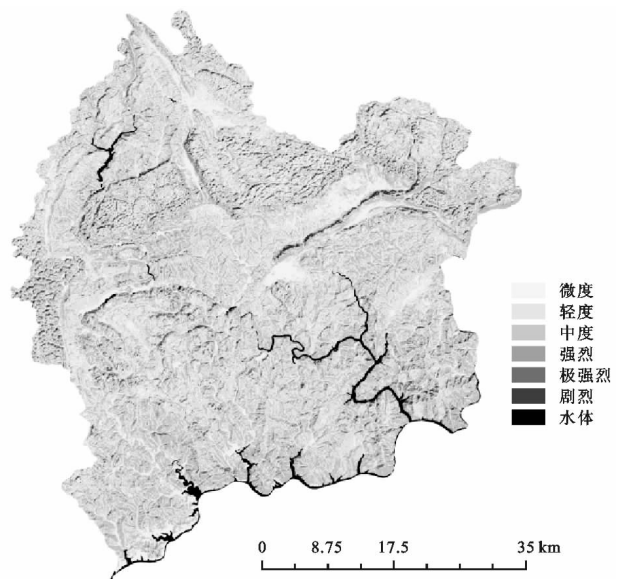


图 5 罗甸县 2014 年土壤侵蚀强度空间分布

表 2 罗甸县 2014 年土壤侵蚀情况

土壤侵蚀强度	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈	总计
面积/km ²	336.85	1106.30	1165.71	204.03	98.25	34.32	2945.46
面积比例/%	11.22	36.85	38.83	6.80	3.27	1.14	98.11
侵蚀量/(t·a ⁻¹)	31579.89	103574.40	224229.11	94703.43	91606.64	49287.11	594980.57
侵蚀量比例/%	5.31	17.41	37.69	15.92	15.40	8.28	100

罗甸县国土面积 3 002 km²,水体面积为 56.54 km²,占罗甸土地总面积的 1.89%。各土壤侵蚀强度中覆盖面积最大的是中度侵蚀,其次是轻度侵蚀,分别占罗甸县总面积的 38.83%和 36.85%。微度侵蚀、强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀分别占罗甸县总面积的 11.22%,6.80%,3.27%和 1.14%。从侵蚀量来看,罗甸县 2014 年总的侵蚀量为 594 980.57 t,其中,贡献最大的是中度侵蚀,占总侵蚀量的37.69%;其次是轻度侵蚀,占总侵蚀量的 17.41%。强烈侵蚀、极强烈侵蚀、剧烈侵蚀和微度侵蚀分别占总侵蚀量的 15.92%,15.40%,8.28%和 5.31%。

2.3 研究区地形起伏度与区域土壤侵蚀的相关性分析

为了解地形起伏度与土壤侵蚀间的相关性大小,本文采用简单相关性分析进行探究。为保证统计样本的数量并避免地形起伏度提取时的边界效应,在 ArcGIS 10.2 中运用网格法按照 50 km² 作为统计单元均分研究区,舍掉不足的统计单元,得到 39 个统计样本。按照文中 1.3.2 节和 2.2 节叙述的方法,分别提取每个样本的坡度因子图层、土地利用类型因子图层和植被覆盖度因子图层,重分类后依照图 2 所示的逻辑关系运用 ArcGIS 10.2 空间分析模块中的矢量相交叠置分析功能,估算每个样本的土壤侵蚀量及其侵蚀模数,在 Excel 中绘制散点图,结果如图 6,图 7 所示。

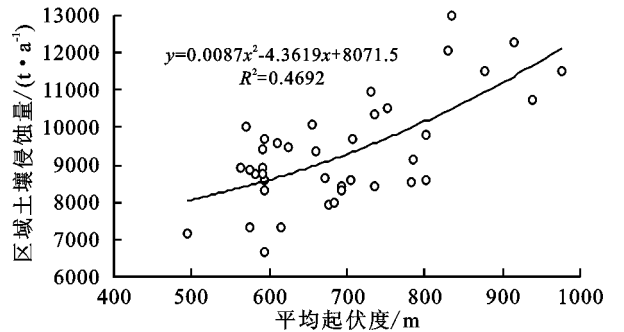


图 6 研究区土壤侵蚀量与地形起伏度的相关性分析

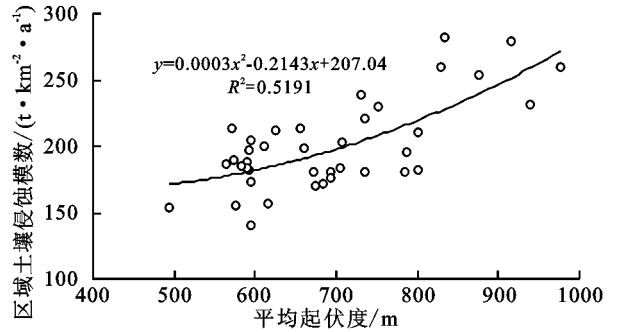


图 7 研究区土壤侵蚀模数与地形起伏度的相关性分析

总体趋势上,罗甸县的地形起伏度与其土壤侵蚀存在正相关关系,即是说地形起伏度越大,其土壤侵蚀越严重。然而也存在地形起伏度低地区的侵蚀严重于地形起伏度高的地区,这是由于地形只是影响土壤侵蚀的主要因素之一。区域的植被覆盖情况、降雨量、水土保持措施、人民环保意识等也是土壤侵蚀的

主要诱因。另外,在影响土壤侵蚀的地形地貌因子中,地形起伏度也只是影响因素之一,地表粗糙度、沟壑密度、地表切割深度等也会严重影响土壤的侵蚀情况。总的来说,区域土壤侵蚀是众多自然因素与人文因素共同作用的结果。本研究中,罗甸县的地形起伏度与土壤侵蚀量的相关系数为 0.469 2,与土壤侵蚀模数的相关系数为 0.519 1。由此可以看出,土壤侵蚀模数更能表征与该研究区地表状况间的关系,拟合方程为 $y=0.0003x^2-0.2143x+207.04$ 。

3 结论

本文在 3S 技术的支持下,确定了罗甸县基于 DEM(空间分辨率为 30 m×30 m)提取地形起伏度的最佳分析窗口为 32×32,最佳统计面积为 0.921 6 km²,实证了均值变点分析方法提取地形最佳分析窗口的可行性。相关性研究表明,研究区地形起伏度与区域土壤侵蚀大致呈正相关关系,相关系数为 0.519 1,充分说明了作为宏观地形因子之一的地形起伏度是区域土壤侵蚀的主导因素之一。在制定相应的区域

土壤侵蚀恢复及治理措施时,充分考虑地形地貌的影响,因地制宜、有针对性的措施是十分必要的。

参考文献:

- [1] 刘训美. 基于县域尺度重庆市地表起伏度的计算及其与滑坡灾害频次的空间耦合关系研究[D]. 重庆:重庆师范大学,2014.
 - [2] 王靖滢. 地表起伏度与区域水土流失的相关性分析[D]. 重庆:重庆师范大学,2014.
 - [3] 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.
 - [4] 常直杨,王建,白世彪,等. 均值变点分析法在最佳集水面积阈值确定中的应用[J]. 南京师大学报:自然科学版,2014,37(1):147-150.
 - [5] 涂汉明,刘振东. 中国地势起伏度最佳统计单元的求证[J]. 湖北大学学报:自然科学版,1990,12(3):266-271.
 - [6] 杨勤科,赵牡丹,刘咏梅,等. DEM 与区域土壤侵蚀地形因子研究[J]. 地理信息世界,2009,7(1):25-31.
 - [7] 贾坤,姚云军,魏香琴,等. 植被覆盖度遥感估算研究进展[J]. 地球科学进展,2013,28(7):774-782.
- ~~~~~
- (上接第 126 页)
- [14] 张富刚,刘彦随,张濛文. 东部沿海地区农村发展功能定位与生产要素整合模式探讨[J]. 农业现代化研究,2009,30(1):1-5.
 - [15] 龙花楼,李裕瑞,刘彦随. 中国空心化村庄演化特征及其动力机制[J]. 地理学报,2009,64(10):1203-1213.
 - [16] 张军英. 空心村改造的规划设计探索:以安徽省巢湖地区空心村改造为例[J]. 建筑学报,1999(6):12-15.
 - [17] 刘洪彪,甘辉. 新农村建设中“空心村”的整治[J]. 农业现代化研究,2007,28(5):586-588.
 - [18] 袁可林. 中原兴起“空心村”治理热[J]. 河南国土资源,2004,(10):4-6.
 - [19] 褚燕. 枣庄市峰城区“空心村”治理的做法[J]. 山东国土资源,2008,24(2):48,50.
 - [20] 朱晓华,陈秧分,刘彦随,等. 空心村土地整治潜力调查与评价技术方法:以山东省禹城市为例[J]. 地理学报,2010,65(6):736-744.
 - [21] 刘景双,王金达,张学林,等. 煤矿塌陷地复垦还田生态重建研究:以抚顺煤矿为例[J]. 地理科学,2000,20(2):189-192.
 - [22] 郭道宇,张金屯,宫辉力,等. 安太堡矿区复垦地植被恢复过程多样性变化[J]. 生态学报,2005,25(4):763-770.
 - [23] 陈涛. 磷矿渣覆土还田利用可行性研究[D]. 武汉:华中农业大学,2007.
 - [24] 唐启义,冯明光. DPS 数据处理系统:试验设计、统计分析及数据[M]. 北京:科学出版社,2007.
 - [25] 黄耀华,王侃,苏婷婷,等. 重庆农村土墙型复垦宅基地土壤肥力特征及改造利用研究[J]. 西南大学学报:自然科学版,2015,37(1):33-39.
 - [26] 路文涛,贾志宽,高飞,等. 秸秆还田对宁南旱作农田土壤水分及作物生产力的影响[J]. 农业环境科学学报,2011,30(1):93-99.
 - [27] 马晓丽,贾志宽,肖恩时,等. 渭北旱塬秸秆还田对土壤水分及作物水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(5):59-64.
 - [28] 吕美蓉,李增嘉,张涛,等. 少免耕与秸秆还田对极端土壤水分及冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(1):41-46.
 - [29] 王燕培,柴守玺,陈玉章,等. 不同秸秆还田处理对旱地冬小麦土壤水分的影响[J]. 水土保持研究,2014,21(6):164-170.
 - [30] 周怀平,解文艳,关春林,等. 长期秸秆还田对旱地玉米产量、效益及水分利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(2):321-330.
 - [31] 余坤,冯浩,赵英,等. 氮化秸秆还田加快秸秆分解提高冬小麦产量和水分利用效率[J]. 农业工程学报,2015,31(19):103-111.
 - [32] 王茂林,李成英. 粉煤灰在农业方面的利用[J]. 粉煤灰综合利用,1997(3):48-50.