

# 基于水土流失敏感性的岩溶地区景观生态风险评价 ——以黔南州为例

谢 刚, 谢元贵, 廖小锋, 肖玖军, 卢 兰

(贵州省山地资源研究所, 贵阳 550001)

**摘 要:**为揭示岩溶地区水土流失与生态格局的相关性,分析水土流失敏感性背景下景观生态风险的空间特征。以黔南州为研究对象,融合 RUSLE 模型和 ERI 评价方法,在分析水土流失敏感性的基础上,对县域尺度的景观生态风险进行了定量化评价。结果表明:(1) 黔南州水土流失敏感性以中度、轻度和低敏感区为主,其总面积为 22 974.42 km<sup>2</sup>,比重达 88.86%,但重度、极度敏感区面积仅占 11.14%,且降水侵蚀力、地表起伏度和石漠化等级的空间相关性高。(2) 低生态风险区主要由水土流失轻度、不敏感区构成,耕地面积比重大(72.07%),高生态风险区则以中度、重度敏感区为主,且建设用地面积比重大,说明水土流失敏感性就越高,则区域生态风险越高。上述研究表明,从水土流失敏感性的角度评价景观生态风险,融合了景观格局和水土流失状况等信息,不仅丰富了区域生态风险评价方法,也为区域生态保护与修复提供了决策依据。

**关键词:**水土流失敏感性;岩溶;景观生态风险;评价

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)03-0298-07

## Ecological Risk Assessment Based on Soil and Water Loss in Karst Area —A Case Study of Qiannan Prefecture

XIE Gang, XIE Yuangui, LIAO Xiaofeng, XIAO Jiuju, LU Lan

(Institute of Guizhou Mountainous Resources, Guiyang 550001, China)

**Abstract:** In order to reveal the correlation between soil and water loss and ecological pattern in karst area, the spatial characteristics of landscape ecological risk under the sensitive background of soil erosion are analyzed. The paper took Qiannan as the research case, combined RUSLE model and ERI evaluation method, we quantitatively analyzed the landscape ecological risk on County scale based on the sensitivity analysis of soil erosion. The results showed that: (1) to moderate, mild and low sensitive area based sensitivity of soil erosion in Qiannan Prefecture, the total area is 22 974.42 km<sup>2</sup>, the proportion is 88.86%, but severe and extremely sensitive area account for only 11.14%, and the rainfall erosion force, surface undulation and desertification have the high spatial correlation; (2) low ecological risk zone mainly distributes in the area with slight soil erosion and mild sensitivity and cultivated land accounting for 72.07%; high ecological risk areas distribute in the regions with moderate and severe sensitivity, and large construction land area, showing that soil erosion sensitivity is higher, the regional ecological risk is high. The study shows that landscape ecological risk assessment from the perspective of soil erosion sensitivity and integration of landscape pattern and ecological environment quality information not only enriches the regional ecological risk assessment method, but also provides decision-making basis for regional ecological protection and restoration.

**Keywords:** soil erosion sensitivity; karst; landscape ecological risk; evaluation

水土流失及其造成的生态环境效益<sup>[1]</sup>(包括土壤资源减少、旱涝和地质灾害加剧、生态系统失衡、石漠化等)已对自然环境的健康、稳定构成了严重威胁,同

时人类活动对地表水—土—植被的负向性干预,使得水土流失态势日益严峻,对人类生活和社会经济的可持续发展产生明显的胁迫作用,成为当今世界各国共

同面临的一个普遍性环境问题<sup>[2-3]</sup>。

岩溶地区地表、地下二元水土流失特征直接加剧了生态环境的脆弱性,进一步影响区域景观生态风险的时空异质性,开展区域水土流失及其生态风险评价研究,不仅可以加深对水土流失对景观格局的认知和理解,也对水土流失综合治理的生态效益评价具有重要意义<sup>[4]</sup>。近年来,景观生态风险评价尺度已从小尺度(小流域等)向中大尺度(高原等)转变<sup>[5-6]</sup>,风险源分析也从综合景观风险逐步向单一风险过渡<sup>[7-8]</sup>,尤其是水土流失与区域生态风险源的相关性逐渐成为学者们关注的焦点。Boardman等<sup>[9]</sup>认为水土流失直接影响水土生态服务功能,加剧区域生态风险;Meng等<sup>[10]</sup>将水土流失纳入到生态风险评价的概念模型中,发现水土流失等生态治理有助于降低区域生态风险;张志国<sup>[11]</sup>提出了水土保持生态风险评价方法与步骤;梁玉华等<sup>[12]</sup>将土壤侵蚀模型、水土流失面积比纳入生态风险评价指标体系中,揭示水土流失对生态风险的影响;但以往研究单从土地利用类型的角度评价景观生态风险指数,水土流失的空间特征只作为一种影响因素进行分析,并未融入到生态风险量化过程,而水土流失特征作为地表降水、覆被、坡度和土壤质地的综合反映<sup>[13]</sup>,是探究区域生态风险源的重要途径之一,如何构建基于水土流失特征的景观生态风险评价模型,成为岩溶地区生态风险评价亟待解决的关键问题。

岩溶地区水土流失不仅加剧了生态环境的脆弱性,也导致石漠化和农村生态贫困现象的发生。基于此,本文融合RUSLE模型和ERI评价方法原理,构建SERI(水土流失敏感性—生态风险指数)评价模型,尝试分析水土流失敏感性背景下景观生态风险的空间分布规律及其主要影响因子,以期为区域水土保持建设与生态扶贫,制定生态风险的综合管控对策提供理论支撑。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 研究区概况

黔南州地处云贵高原东南部向广西丘陵过渡的斜坡地带,其经纬度位于 $106^{\circ}12'—108^{\circ}18'E$ , $25^{\circ}04'—27^{\circ}29'E$ ,地势西北高,东南低,平均海拔997 m,国土总面积为26 197 km<sup>2</sup>。全州河流侵蚀切割强烈,山地峡谷地貌广布,地下岩溶发育,暗河、溶洞发育,地面峰丛、峰林、槽谷、洼地分布普遍,岩溶面积占全州总面积的81.5%,石漠化面积占27.71%。研究区属亚热带季风湿润气候,平均气温为13.6~19.6℃,年平均降雨量为1 200 mm,年总降水量达367.4亿

m<sup>3</sup>,水资源蕴藏量约2.1亿m<sup>3</sup>。境内河网涉及长江和珠江水系,河网密度达0.2 km/km<sup>2</sup>,地表水资源丰富,多年平均值达162.54亿m<sup>3</sup>。州内土壤资源可划分为5个土纲,10个土类,25个亚类,85个土属,603个土种,土壤类型以赤红壤土类(砖红壤性红壤)、红壤土类(红泥土)、黄壤土类(黄泥土)、石灰土类为主。植被为亚热带常绿阔叶林,森林覆盖率达54.36%以上。

### 1.2 数据来源

本研究采用的黔南州各市县行政边界数据由黔南州国土资源局提供。DEM(Digital Elevation Model 数字高程模型)来源于国家地理空间数据云,其格网大小为30 m×30 m,主要用于提取全州地表起伏度、坡度,其提取方法为ArcMap软件平台中的Spatial Analyst功能。全州土壤类型图来源于《贵州省农业综合区划》中的1:10万贵州省土壤类型图,在对其矢量化的基础上实现与其他因子的空间叠加。石漠化数据、土地利用景观数据均来源于遥感影像解译,其涉及的遥感影像分别为2010年6月、2014年9月Landsat-ETM影像(30 m分辨率)。气象站点数据为由贵州省气象局提供的近54 a黔南州12个气象站点的多年月降雨量插值数据。另外,研究区的社会经济数据来源于《2015年黔南州统计年鉴》整理。

### 1.3 研究方法

1.3.1 水土流失敏感性模型及其指标值 依据RUSLE模型<sup>[14]</sup>作为区域土壤侵蚀风险评估和水土保持规划的有效运用,在RUSLE模型的原理上,构建水土流失敏感性指数SS,其数学表达式为:

$$SS = \sqrt[5]{A} = \sqrt[5]{R \times K \times LS \times C \times P} \quad (1)$$

式中:A为土壤侵蚀量;R为降水侵蚀力指标;K为土壤可侵蚀系数;LS为坡度坡长因子;C为地表覆盖度;P为水土流失措施因子。根据2002年国务院、国家环保总局发布的《生态功能区划技术暂行规程》和《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190—2007),对黔南州水土流失敏感性进行分级与评价,具体划分标准见表1。考虑到数据的可获取性,本文涉及的RUSLE模型指标数据中,以土壤质地因子来表征土壤可蚀性,以地形起伏度表示坡度坡长因子,以植被覆盖度表示地表覆盖因子,以土地利用类型表征水土保持因子。

(1) 降水侵蚀力指标(R)。由于研究区缺乏短历时的降雨资料,故借鉴改进的R值经验公式<sup>[15]</sup>,利用黔南州各县市气象站点的月降雨数据计算出年度降雨侵蚀力,运用Kriging插值法得到整个黔南州R值分布图。

$$R = \sum_{i=1}^n (-1.553 + 0.179P_i) \quad (2)$$

式中: $R$  为年降雨侵蚀力指标值; $P_i(i=1,2,3,\cdots,12)$ 为各个站点的月降雨量(mm)。

(2) 土壤可蚀性因子( $K$ )。由于大尺度范围内直接测定  $K$  值不具备可行性,而相关研究表明不同土壤类型具有相对稳定的土壤可蚀性,因此,本文采用中国主要土壤的可蚀性  $K$  值多年监测值<sup>[16]</sup>,结合贵州省土壤类型图(1:10 万),土壤空间分布特征等资料<sup>[17]</sup>,参照表 1 的分级标准进行土壤可蚀性重分类。

(3) 地表起伏度因子(RSDL)。坡度坡长因子仅只有数学意义而不具备土壤侵蚀和地貌学意义<sup>[18]</sup>。相对而言,地形起伏度(地表实际面积与投影面积之比)由于能够体现地势地貌的差异,故较适合于大尺度流域水土流失评价。黔南州岩溶地貌发育,山高坡陡,地形起伏高差大,水土流失敏感性强。因此,本研究选用地形起伏度来表征坡度坡长因子(地形地貌)对水土流失过程的影响。以 30 m 分辨率的 DEM 数据为基础,在 Arc-Map 软件的 Spatial Analyst 模块下选用 30 m×30 m 为窗口提取地形起伏度,其计算公式<sup>[19]</sup>为:

表 1 黔南州水土流失敏感性影响因子分级标准

因子名称	不敏感等级	轻度敏感等级	中度敏感等级	重度敏感等级	极度敏感等级
降雨侵蚀力/mm·(hm <sup>2</sup> ·a) <sup>-1</sup>	164~175	175~192	192~205	205~225	225~250
土壤类型 $K$ 值	草甸土	人为土	黄壤/紫色土	(赤)红壤	石灰土
地形起伏度/%	1~1.5	1.5~2.0	2.0~2.5	2.5~3.0	>3.0
石漠化等级	非喀斯特	轻度石漠化	中度石漠化	重度石漠化	(极)强度石漠化
土地利用类型	耕地	林地/园地	裸岩地	草地	建设用地/水域

1.3.2 景观损失度指数 土地利用变化过程对生态环境的干扰和影响直接改变着景观格局的空间特征,采用景观生态损失指数可以反映土地利用变化对生态环境造成的潜在生态损失和风险。通过评价单元的景观指数将景观格局变化特征转化成生态风险值组成部分,即景观生态风险损失度指数( $EL_i$ )。常用于反映不同景观类型所代表的生态系统受到干扰的程度,其值可通过景观破碎度( $C_i$ )、分离度( $S_i$ )和优势度指数( $D_i$ )加权计算得到,其计算公式如下<sup>[23]</sup>:

$$EL_i=aC_i+bS_i+cD_i \quad (4)$$

式(7)中, $EL_i$ 、 $C_i$ 、 $S_i$ 、 $D_i$  所代表的含义与上述相同,其中  $C_i$ 、 $S_i$ 、 $D_i$  的具体计算步骤参照景观生态风险指数的计算方法; $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别代表景观破碎度、分离度和优势度指数的权重,其对应取值分别为 0.6、0.3、0.1<sup>[24-25]</sup>。

1.3.3 基于水土流失的生态风险评价指数(SERI)

区域生态风险主要受生态环境要素状况和空间特征的影响,岩溶地区脆弱的水土环境和破碎的景观格局共同导致生态风险的提升,其对应的生态风险源为脆弱的岩溶环境和人类活动的空间干扰,如降水时空

$$RSDL=\frac{A_m}{A_i} \quad (3)$$

式中: $RSDL$  为地表起伏度; $A_m$  代表单元窗口地表实际面积; $A_i$  代表单元窗口的投影面积。

(4) 石漠化等级(SD)。地表的基岩的裸露率和植被的覆盖率是表征和评价喀斯特石漠化等级程度的关键性指标,也是表征地表覆盖度的重要因子,本研究参考植被覆盖度与石漠化等级的关系<sup>[20-21]</sup>代替  $C$  值的估算,从而将不同石漠化等级分成不同的地表覆盖度。

(5) 水土保持措施因子( $P$ )。由于土地利用与覆被变化能够反映水土保持措施的差异,且已有研究常采用土地利用类型赋值法来确定  $P$  值,故本文参考相关研究成果<sup>[21-22]</sup>和各土地利用类型区水土保持政策,对各类土地利用类型水土保持因子进行赋值(表 1)。另外,通过上述因子特征,统一采用自然断点法的指标分级标准为判读依据,将黔南州水土流失敏感性等级划分为不敏感、轻度敏感、中度敏感、重度敏感和极度敏感 5 个级别。

差异、城市化景观扩展和落后农耕活动等。一般而言,生态环境所受的干扰度越大,则水土流失的敏感性越强,其景观生态风险也就越大,反之,则越小。总结以往生态风险指数计算方法,本文提出基于水土流失敏感性指数的生态风险评价模型,反映水土流失、景观格局与生态风险的空间相关性<sup>[26-27]</sup>。也就是说通过景观损失度指数和水土流失敏感度指数,将水土流失敏感性指数纳入到生态风险指数计算式中,得出 SERI 指数的具体计算公式:

$$SERI=\sum_{i=1}^m\frac{A_i}{A}\sqrt{EL_i\times SS_i} \quad (5)$$

式中: $SERI$  为基于水土流失敏感性的景观生态风险指数; $EL_i$  为第  $i$  类景观生态损失指数; $SS_i$  为第  $i$  类景观水土流失敏感性指数; $A_i$ 、 $A$  分别为第类景观类型面积和研究区总面积; $m$  为采样区网格单元内景观类型数目; $i$  为耕地、林地、水体和建设用地等 7 种景观类型。由于岩溶地区生态风险的不确定性和等级划分普适性标准缺失的原因,故本文对评价结果采用自然断点法分类,即划分成低风险区、较低风险区、中等风险区、较高风险区和高风险区 5 类。

## 2 结果与分析

### 2.1 水土流失敏感性评价

岩溶地貌发育和人为干扰导致地表覆被的水土涵养能力较弱,水土流失敏感性较高,特别是石漠化强度大,地形起伏度大的地区。根据研究区水土流失敏感性的评价结果(表 2)可知,黔南州水土流失敏感性等级以不敏感和轻度敏感为主,两者面积占全州总面积的 76.14%。全州水土流失不敏感区为 22 936.56 km<sup>2</sup>,占州国土面积的 48.88%,其集中分布在福泉市、贵定县、龙里县和瓮安县,占不敏感区总面积的 73.24%;

轻度敏感区总面积达 12 789.73 km<sup>2</sup>,仅次于不敏感区面积,主要分布于瓮安县、荔波县,两者面积分别为 2 275.84 km<sup>2</sup>,1 804.78 km<sup>2</sup>;中度、重度、极度敏感区三者面积总和为 11 194.33 km<sup>2</sup>,不及不敏感区面积的 1/2,其中,中度敏感区分布较为均匀,各县平均分布面积为 8.33 km<sup>2</sup>,重度敏感区集聚性明显,如惠水县和长顺县重度敏感区面积分别为 619.90 km<sup>2</sup>和 639.33 km<sup>2</sup>,而瓮安县、福泉市分布面积仅有 0.07 km<sup>2</sup>,0.43 km<sup>2</sup>,极度敏感区则主要分布于都匀市和长顺县,两者面积比重分别为 23.40%和 19.99%,其余县的平均分布面积比重却仅有 5.66%。

表 2 黔南州水土流失敏感性等级县域分布特征

行政区	不敏感等级		轻度敏感等级		中度敏感等级		重度敏感等级		极度敏感等级	
	面积/km <sup>2</sup>	比重/%	面积/km <sup>2</sup>	比重/%	面积/km <sup>2</sup>	比重/%	面积/km <sup>2</sup>	比重/%	面积/km <sup>2</sup>	比重/%
都匀市	309.22	1.35	1004.63	7.86	1169.53	15.06	458.61	16.13	137.30	23.40
独山县	934.69	4.08	1472.74	11.51	991.74	12.77	197.35	6.94	24.90	4.24
福泉市	4034.44	17.59	380.79	2.98	173.22	2.23	12.31	0.43	0.84	0.14
贵定县	4491.53	19.58	1170.28	9.15	473.84	6.10	92.69	3.26	9.66	1.65
惠水县	684.46	2.98	1016.26	7.95	945.93	12.18	619.90	21.80	94.52	16.11
荔波县	1299.54	5.67	1804.78	14.11	530.39	6.83	148.07	5.21	32.86	5.60
龙里县	4279.80	18.66	806.33	6.30	145.00	1.87	18.87	0.66	4.01	0.68
罗甸县	1059.02	4.62	1072.66	8.39	872.96	11.24	281.69	9.91	83.23	14.18
平塘县	769.18	3.35	1230.05	9.62	1080.03	13.91	298.99	10.51	73.99	12.61
三都县	1047.57	4.57	2275.84	17.79	648.85	8.36	73.41	2.58	7.89	1.34
瓮安县	3993.97	17.41	184.67	1.44	24.44	0.31	1.95	0.07	0.29	0.05
长顺县	33.15	0.14	370.70	2.90	707.80	9.12	639.93	22.50	117.33	19.99
总计	22936.5	—	12789.7	—	7763.7	—	2843.7	—	586.8	—

根据黔南州水土流失敏感性空间分布规律(图 1)可以看出,黔南州水土流失敏感性等级面积差异显著,空间异质性强,极度、重度敏感区呈点状分布于都匀市和长顺县峰丛洼地区,沿地表大型褶皱带密集分布,而不敏感区则呈面状集中连片分布于峰林坝子地和低缓山地丘陵区。另外,水土流失敏感性分布特征与降雨侵蚀力、石漠化等级、地表起伏度的空间相关性较高,与土壤类型、土地利用的相关性较低(表 3),其因为黔南州充足的降水量为水土流失提供了首要动力条件,而岩溶地区土壤环境的抗侵蚀能力和地表覆被状况又直接导致水流流失敏感性的高低,一般而言,高降水侵蚀力、高地表起伏度和强度石漠化地区水土流失敏感性高,反之则低,如都匀市水土流失的敏感性主要取决于高降水侵蚀力和显著的地表起伏度,长顺县水土流失敏感性则取决于高降水侵蚀力和石漠化等级,这也表明利用地表起伏度替换坡度坡长因子,利用石漠化等级替换植被覆盖率具有一定的合理性。

表 3 水土流失敏感性因子图层的空间相关性系数

因子图层相关性	水土流失 敏感性	降雨侵 蚀力	土壤 类型	地表 起伏度	土地 利用	石漠化 等级
水土流失敏感性	1.00					
降雨侵蚀力	0.41	1.00				
土壤类型	0.09	-11.49	1.00			
地表起伏度	0.35	0.01	-15.21	1.00		
土地利用	-0.02	-0.04	-2.55	-0.11	1.00	
石漠化等级	0.44	-0.10	-1.45	-0.01	0.06	1.00

### 2.2 基于水土流失敏感性的景观生态风险评价

在分析黔南州水土流失敏感性的基础上,利用基于水土流失的景观生态风险评价模型得出黔南州生态风险评价结果(图 2)。从图 2 中可以看出,黔南州基于水土流失的生态风险等级以低风险区和较低风险区为主,连续分布于各个市县,低风险区总面积达 17 242.77 km<sup>2</sup>,占全州国土面积的 66.65%,而较低风险区虽广泛分布于全州各地区,但总面积仅占低风

险区的 33.48%。中等风险区、高风险和较高风险区则以点状集中分布于都匀市、长顺县、罗甸县等部分地区,三者总面积 2 853.43 km<sup>2</sup>,总比重 11.03%,其中,高风险区面积比重仅有 0.47%,为各类风险区分布范围最小的分区(表 4)。

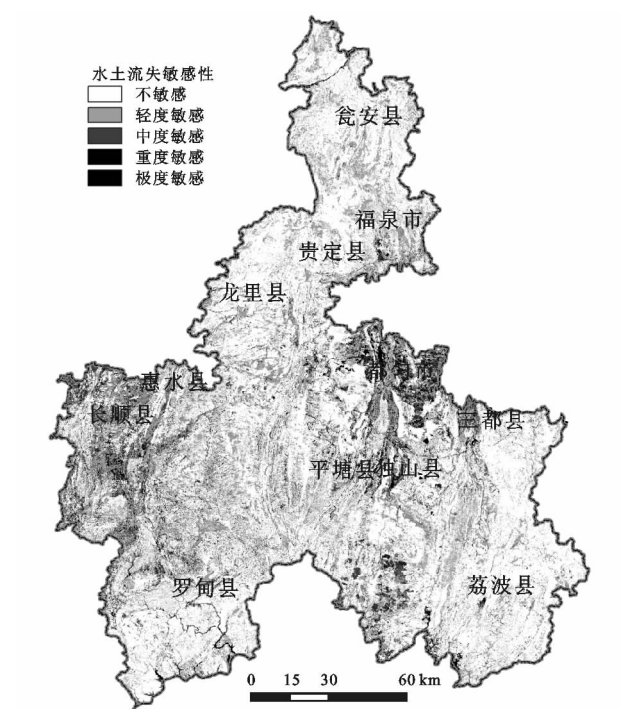


图 1 黔南州水土流失敏感性等级空间分布特征

2.2.1 生态风险与水土流失敏感性 由表 5 可知,黔南州水土流失敏感性与景观生态风险的空间关联性差异显著,但整体而言,水土流失敏感性与景观生态风险呈正相关,景观生态风险等级越低,则水土流失敏感性也越低,反之则越高,这也表明从水土流失敏感性的角度表征生态风险的高低,具有较高的合理性和客观性。黔南州中度以下水土流失敏感区空间关联性强,其空间叠加面积达 16 242.22 km<sup>2</sup>,而与重度、极度敏感区的空间分布重合面积仅有 618.52 km<sup>2</sup>,其因为景观生态低风险区多分布于山地丘陵的林草地地区,地表覆被良好,土层抗风化、水蚀能力强,水土流失的敏感性也较低,体现出林草等植被对水土保持的重要性;相比于低风险区空间特征,较低风险区则主要分布于水土流失不敏感区、轻度敏感区和重度敏感区,其因为水土流失重度敏感区分布于降水相对集中,但地表起伏度大的峰丛洼地区,生态环境相对较好的林草覆盖区中度风险区与中度敏感区的空间关联面积最大,其重合面积达到 1 250.43 km<sup>2</sup>,占重合总面积的 56.43%。另外,较高风险区和高风险区均与重度风险区的空间关联度最高,其空间关联比重分别为 34.07%和 43.25%。

表 4 黔南州各生态风险分区面积与比重

生态风险特征	低风险区	较低风险区	中等风险区	较高风险区	高风险区
分区面积/km <sup>2</sup>	17242.77	5773.62	2103.78	627.94	121.71
分区比重/%	66.65	22.32	8.13	2.43	0.47

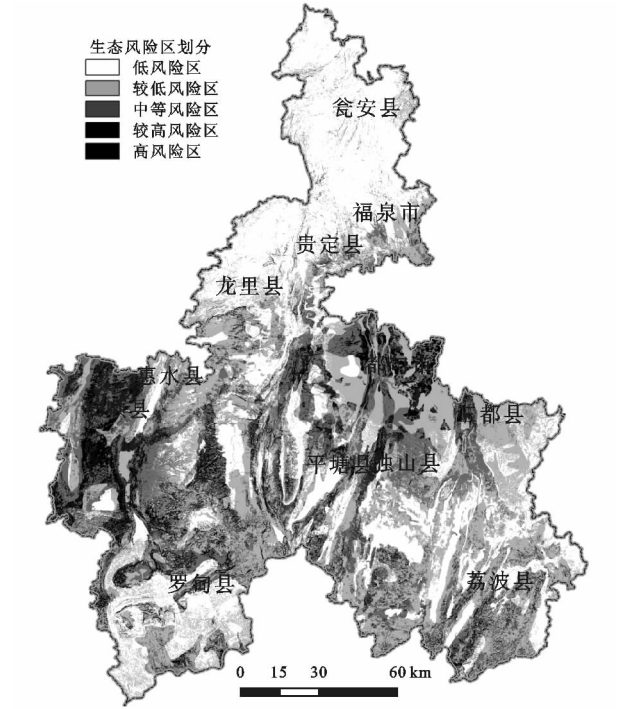


图 2 黔南州基于水土流失的景观生态风险区划分结果

表 5 黔南州水土流失敏感性与景观生态风险的空间重合

水土流失与生态风险的空间重合	低风险区/km <sup>2</sup>	较低风险区/km <sup>2</sup>	中等风险区/km <sup>2</sup>	较高风险区/km <sup>2</sup>	高风险区/km <sup>2</sup>
不敏感区/km <sup>2</sup>	6346.95	2034.83	279.14	8.22	0.27
轻度敏感区/km <sup>2</sup>	6095.20	1807.80	364.78	171.73	5.39
中度敏感区/km <sup>2</sup>	3800.07	608.05	1250.43	148.36	53.20
重度敏感区/km <sup>2</sup>	513.32	1203.66	304.78	225.52	55.18
极度敏感区/km <sup>2</sup>	105.19	334.16	16.85	108.09	13.54

2.2.2 生态风险与景观类型 从表 6 可以看出,区域景观格局与景观类型(土地利用)对生态风险的影响较为显著,较高等级以下的生态风险区均主要涉及林地和耕地覆被区,但同一景观生态风险区中,各类景观类型所占的比重悬殊,如较低风险区内的耕地面积达 3 184.45 km<sup>2</sup>,是其余景观类型面积的 3.99 倍;高风险区包含的建设用地面积为 47.15 km<sup>2</sup>,而草地面积仅有 0.93 km<sup>2</sup>,仅有该风险区建设用地面积的 0.02 倍。从各类景观风险区所包含的景观类型面积和比重可以发现,耕地是低风险区、较低风险区、中等风险区和较高风险区的主要风险源,所涉及的面积比重分别为 72.07%,79.98%,67.87%和 53.26%,而高风险区的风险源主要是建设用地,其主要原因为岩溶地区石漠化现象广布,地形起伏度大,农业发展相

对比落后,导致区域景观结构破碎、生态环境脆弱,出现不同程度的生态风险。相比之下,建设用地则因缺乏生态系统的完整要素,受人类建设活动影响剧烈,使得生态风险高。值得一提的是岩溶地区未利用地以沙土、岩石裸露区为主,其隶属于中等风险区和较高风险区的面积比重分别为 10.41%和 8.08%,表明无植被覆盖区生态风险水平也较高。综上所述,随着耕地、林地面积面积逐渐减少,建设用地、未利用地面积逐渐增加,则生态风险等级也逐渐提升。

表 6 黔南州景观类型与生态风险的空间相关性

土地利用 类型	低风险 区/km <sup>2</sup>	较低风 险区/km <sup>2</sup>	中等风 险区/km <sup>2</sup>	较高风 险区/km <sup>2</sup>	高风险 区/km <sup>2</sup>	合计
耕地	2482.88	3184.45	1302.43	323.39	32.59	7325.74
园地	165.33	51.30	25.42	22.66	13.07	277.78
林地	489.27	201.62	78.23	25.98	3.76	798.86
草地	75.03	139.43	27.32	4.87	0.93	247.59
水域	39.76	43.38	90.44	52.80	19.23	245.61
未利用地	72.37	187.63	199.80	49.05	1.48	510.33
建设用地	120.25	173.99	195.27	128.45	47.15	599.41

3 讨论

景观生态风险受水土环境自身状况和空间分布特征决定,不同的水土环境决定了地表覆被状况,生态环境的稳定性和生物多样性。本文在对岩溶地区生态环境脆弱性分析的基础上,建立了黔南州水土流失敏感性评价的指标体系,然后应用 RS/GIS 的空间分析功能对其进行叠加分析,获得了基于水土流失敏感性的黔南州景观生态风险空间分布极其生态风险等级,分析表明基于水土流失敏感性的景观生态风险的评价方法,融合了生态景观格局和生态环境质量等信息,进一步丰富了区域生态风险评价方法,但相比于常规的 RUSLE 模型使用的标准数据集,本文对坡度坡长因子、土壤可蚀性因子和地表覆被因子分别替换成地表起伏度、土壤类型和石漠化等级,指标替换的适用性、准确性如何仍有待于进一步验证,从而建立适用于西南岩溶山区的水土流失敏感性评价指标体系。因此,在定量分析水土流失与景观生态风险的基础上,应针对岩溶地区开展的 RUSLE 模型的进行修正,探讨不同水土流失敏感程度的景观生态风险管控对策。

4 结论

(1) 黔南州水土流失敏感性以轻度敏感和不敏感等级为主,且中度以下敏感区则普遍分布于各个市

县低缓峰丛洼地边缘和坡耕地地区,其空间分布总面积达 22 974.42 km<sup>2</sup>,占全州国土面积的 88.86%,而极度、重度敏感区仅呈点状集中分布于高地表起伏度的石漠化地区。另外,西南岩溶石山地区水土流失的敏感性因素分析结果表明,降水侵蚀力、地表起伏度和石漠化等级是水土流失敏感性主要控制因素,其地域差异性形成水土流失敏感性空间特征关键。

(2) 从水土流失敏感性、景观类型和生态风险三者的关系可知,景观类型区的地表起伏度、植被覆盖和水土资源状况共同决定了水土流失的敏感性及其空间分布,水土流失的敏感性则直接决定生态风险的高低。因此,高生态风险区以中度、重度水土流失敏感性为主,所包括的建设用地、未利用地面积比重也较大,而低生态风险区主要由水土流失轻度、不敏感区构成,两者面积比重达 73.79%,且其覆盖的耕地、林地的面积比重也超多 80%。

(3) 将水土流失敏感性纳入到景观生态风险评价过程中,以生态环境质量和景观空间格局进行耦合结果为生态风险评价结果,与以往的生态风险评价指数模型相比,兼具反映了地表石漠化、植被覆盖状况及其对水土流失的影响,使得评价结果更加真实、合理。

参考文献：

[1] 葛方龙,李伟峰,陈求稳.景观格局演变及其生态效应研究进展[J].生态环境学报,2008,17(6):2511-2519.

[2] Nyakatawa E Z, Jakkula V, Reddy K C, et al. Soil erosion estimation in conservation tillage systems with poultry litter application using RUSLE 2.0 model[J]. Soil & Tillage Research, 2007,94(2):410-419.

[3] 高光耀,傅伯杰,吕一河,等.干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展[J].生态学报,2013,33(1):12-22.

[4] 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.

[5] 张芳挺,熊康宁,陈许,等.喀斯特高原山地水土流失影响因素及生态效益评价:以贵州毕节石桥小流域为例[J].水土保持研究,2009,16(5):88-92.

[6] 许开鹏,王晶晶,迟妍妍,等.基于综合生态风险的云贵高原土地利用优化与持续利用对策[J].生态学报,2016,36(3):821-827.

[7] 胡金龙,周志翔,滕明君,等.基于土地利用变化的典型喀斯特流域生态风险评估:以漓江流域为例[J].应用生态学报,2017,28(6):2003-2012.

[8] 王祺,蒙吉军,孙宁.基于 RRM 模型和不确定性分析的喀斯特地区生态风险管理:贵阳市案例研究[J].山地学报,2016,34(4):476-484.

- [9] Boardman J, Shepherd M L, Walker E, et al. Soil erosion and risk-assessment for on-and off-farm impacts: A test case using the Midhurst area, West Sussex, UK. [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(8):2578-2588.
- [10] Meng J, Zhou T, Y. Liu. Research on regional ecological risk assessment: a case study of Ordos in Inner Mongolia[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2011, 47(5):935-943.
- [11] 张志国,李锐,王国梁. 基于 GIS 的区域水土流失生态风险评价[J]. *中国水土保持科学*, 2007, 5(5):98-101.
- [12] 梁玉华,张军以,樊云龙. 喀斯特生态系统退化诊断特征及风险评价研究:以毕节石漠化为例[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(1):240-245.
- [13] 凡非得,王克林,熊鹰,等. 西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征[J]. *生态学报*, 2011, 31(21):6353-6362.
- [14] Prasannakumar V, Shiny R, Geetha N, et al. Spatial prediction of soil erosion risk by remote sensing, GIS and RUSLE approach: a case study of Siruvani river watershed in Attapady valley, Kerala, India[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64(4):965-972.
- [15] 许月卿,周巧富,李双成. 贵州省降雨侵蚀力时空分布规律分析[J]. *水土保持通报*, 2005, 25(4):11-14.
- [16] 张科利,彭文英,杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. *土壤学报*, 2007, 44(1):7-13.
- [17] 秦松,范成五,孙锐锋. 贵州土壤资源的特点、问题及利用对策[J]. *贵州农业科学*, 2009, 37(5):94-98.
- [18] 赵彩霞. 甘肃白龙江流域生态风险评价[D]. 兰州:兰州大学, 2013.
- [19] ArcGIS 地理信息系统空间分析试验教程. 第 2 版[M]. 北京:科学出版社, 2012.
- [20] 凡非得,王克林,宣勇,等. 西南喀斯特区域生态环境敏感性评价及其空间分布[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(11):1394-1399.
- [21] 张琦,蔡雄飞,汪发勇,等. 喀斯特石漠化与水土流失强度耦合关系分析:以六盘水市为例[J]. *亚热带水土保持*, 2016, 28(3):7-11.
- [22] 陈美淇,魏欣,张科利,等. 基于 CSLE 模型的贵州省水土流失规律分析[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(3):16-21.
- [23] 王娟,崔保山,刘杰,等. 云南澜沧江流域土地利用及其变化对景观生态风险的影响[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(2):269-277.
- [24] 李谢辉,李景宜. 基于 GIS 的区域景观生态风险分析:以渭河下游河流沿线区域为例[J]. *干旱区研究*, 2008, 25(6):899-903.
- [25] 高宾,李小明,李志刚,等. 基于景观格局的锦州湾沿海经济开发区生态风险分析[J]. *生态学报*, 2011, 31(12):3441-3450.
- [26] 查轩,张萍. 基于 GIS 的重要水源地东圳库区土壤侵蚀与景观格局分析[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(3):43-47.
- [27] 吴健生,乔娜,彭建,等. 露天矿区景观生态风险空间分异[J]. *生态学报*, 2013, 33(12):3816-3824.

~~~~~

(上接第 297 页)

- [14] 王军,顿耀龙,郭义强,等. 松嫩平原西部土地整理对盐渍化土壤的改良效果[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(18):266-275.
- [15] 王佳丽,黄贤金,陆汝成,等. 区域生态系统服务对土地利用变化的脆弱性评估:以江苏省环太湖地区碳储量为例[J]. *自然资源学报*, 2010(4):556-563.
- [16] 王广成,李中才. 基于时空尺度及利益关系的生态服务功能[J]. *生态学报*, 2007, 27(11):4758-4765.
- [17] 郝慧梅,任志远. 基于生态服务价值的土地利用/覆盖变化生态效应测评[J]. *资源科学*, 2007, 29(6):90-97.
- [18] 岳书平,张树文,闫业超. 东北样带土地利用变化对生态服务价值的影响[J]. *地理学报*, 2007, 62(8):879-886.
- [19] Guo Y Q, Zheng J Y, Ge Q S, et al. Primary energy-related carbon dioxide emissions in China[J]. *Chinese Journal of Population Resources and Environmen*, 2013, 11(4):283-287.
- [20] 王思远,刘纪远,张增祥,等. 中国土地利用时空特征分析[J]. *地理学报*, 2001, 56(6):631-639.
- [21] 揣小伟,黄贤金,郑泽庆,等. 江苏省土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响[J]. *资源科学*, 2011, 33(10):1932-1939.
- [22] 王军,严慎纯,白中科,等. 土地整理的景观格局与生态效应研究综述[J]. *中国土地科学*, 2012, 26(9):87-94.
- [23] 罗明,郭义强,曹湘潭. 低碳土地整治:打造生态文明建设新平台:以湖南省长沙县低碳土地整治示范项目为例[J]. *中国土地*, 2015(4):6-9.