

# 喀斯特地区石漠化的空间格局及演化敏感性分析

甘敬民<sup>1</sup>, 迟雨蕾<sup>1</sup>, 张天龙<sup>1</sup>, 朱红春<sup>1,2</sup>

(1. 山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 海岛(礁)测绘技术国家测绘地理信息局重点实验室, 山东 青岛 266590)

**摘要:**以石漠化发育典型的贵州省为例,运用多因子综合分析、专家打分和层次分析等方法,建立多因素石漠化强度等级评价及石漠化演化敏感性分析地理模型;获取石漠化研究区的遥感及各类专题数据,在此基础上,定量化处理两种地理模型所需计算因子,计算得到贵州省石漠化等级空间分布及石漠化演化敏感性空间分布结果。通过两模型计算结果发现,贵州省石漠化演化敏感性强度与石漠化强度等级空间分布具有较高一致性。本研究得到石漠化空间分布和演化敏感性规律,可为喀斯特石漠化地区的治理与预警提供科学依据。

**关键词:**喀斯特;石漠化;敏感性;空间建模;地理分析;GIS

中图分类号: X171

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2016)04-0013-08

## Spatial Distribution and Evolved Sensitivity Analysis of Rocky Desertification in Karst Regions

GAN Jingmin<sup>1</sup>, CHI Yulei<sup>1</sup>, ZHANG Tianlong<sup>1</sup>, ZHU Hongchun<sup>1,2</sup>

(1. Geomatics College, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Key Laboratory of Surveying and Mapping Technology on Island and Reef, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Qingdao, Shandong 266590, China)

**Abstract:** Taking Guizhou province which is a typical area of Karst landform as an example, this paper established the geographic models of multi-factor strength rank evaluation of rocky desertification and evolved sensitivity analysis of rocky desertification by using the multi-factor comprehensive analysis, expert scoring method and the analytic hierarchy process (AHP). Based on the remote sensing images and various thematic data obtained in the survey region, calculation factors in the two geographic models were processed quantitatively and spatial distributions of rocky desertification ranks and evolved sensitivity were obtained. The computation results show that there is a high consistency between the spatial distributions of rocky desertification strength ranks and rocky desertification evolved sensitivity in Guizhou province. The spatial distribution of rocky desertification and its evolution laws obtained from this study can provide scientific basis for the governance and early warnings in Karst regions.

**Key words:** Karst; rocky desertification; evolved sensitivity; spatial modeling; geographical analysis; geographic information system (GIS)

石漠化是喀斯特地区受到人类活动干扰而发生的一种土地退化过程,表现为土壤严重侵蚀、岩石大面积裸露;石漠化会使土地承载能力降低、旱灾和涝灾频发,严重影响生态安全,导致生物多样性锐减<sup>[1]</sup>。因此,亟需对石漠化严重区域的分布空间格局及演化敏感性进行分析,深刻认识石漠化的发展态势,剖析石漠化演

收稿日期: 2015-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471331);海岛(礁)测绘技术国家测绘地理信息局重点实验室项目(2015B06)

作者简介: 甘敬民(1992—),男,山东枣庄人,主要从事 GIS 分析与应用方面研究. E-mail: remotesgjm@126.com

朱红春(1977—),男,山东泰安人,副教授,博士后,主要从事 GIS 及遥感系统开发及应用、DEM 数字地形分析,本文通信作者. E-mail: sdney\_xa@163.com

化进程和趋势,为石漠化地区的预警、防治及环境治理、生态建设提供科学依据<sup>[2]</sup>。

遥感(remote sensing,RS)和地理信息系统(geographic information system,GIS)的快速发展为石漠化动态、快捷和精准监测提供了更加便捷的技术手段。众多学者利用 RS 和 GIS 手段,从石漠化成因分析、石漠化等级划分、石漠化演化敏感性等方面进行了深入研究:兰安军等<sup>[3]</sup>建立了贵州省 1:10 万喀斯特石漠化数据库,利用相关分析和主成份分析法,得出石漠化影响因子,并建立喀斯特石漠化动力指数模型,该成果对石漠化的成因研究具有一定参考价值;肖丹等<sup>[4]</sup>利用 GIS 空间分析方法,研究了不同岩性地质情况下地表石漠化发生率,详细分析了石漠化与碳酸盐岩分布的相关性,该研究成果为石漠化的预警与防治提供了科学的参考依据;胡宝清等<sup>[5]</sup>采用相关分析、因子分析和回归分析等方法建立了石漠化动力指数模型,并运用该模型分析验证了石漠化产生的主导原因;兰安军、文锡梅等<sup>[6]</sup>在岩性、坡率、植被覆盖率、土地利用、水土流失和人口密度等指标栅格数据化分析基础上,运用 GIS 空间叠加分析方法,进行贵州省开阳县石漠化敏感性的综合评价,并得到相应敏感性区域等级划分结果,经验证明该结果具有较高的准确度。通过上述研究成果,发现目前对于石漠化空间分布、石漠化演化敏感性趋势及其对环境的影响研究较为充分,但对石漠化空间分布及石漠化演化敏感性关系的探究较少,而该研究内容能更好把握石漠化演化的发展趋势。

本研究利用遥感和地理信息系统空间建模和数据分析方法,建立贵州省石漠化等级划分模型和贵州省石漠化演化敏感性模型,在此基础上,深入分析该研究区石漠化空间格局、演化敏感性及其相关性。

## 1 研究基础

### 1.1 研究区概况

贵州省(24°37'~29°13'N,103°36'~109°35'E)地处中国西南喀斯特中心地区,是亚热带—热带湿润气候区,为高原山地,面积约 17.617 万 km<sup>2</sup>。地势西高东低,自中部向北、东、南三面倾斜。该区土壤主要有石灰壤、红壤、黄壤、赤红壤、水稻土等。因此,贵州省一直是国内石漠化研究的典型区域。

### 1.2 研究数据

本研究所采用的实验数据及其数据详细说明如表 1 所列。

表 1 实验数据列表

Tab.1 The testing data of the research

序号	数据名称	数据的属性	主要用途
1	Landsat ETM+	tif 格式,空间分辨率 30 m,来源:地理空间数据云,成像时间:2011 年 7 月	提取植被覆盖率和基岩裸露率等
2	ARSTER DEM	grid 格式,空间分辨率 30 m,来源:地理空间数据云	土壤侵蚀模数计算,坡度提取等
3	中国土壤数据集	tiff 附加 mdb(比例尺为 1:100 万),来源:寒区旱区科学数据中心,世界土壤数据库(HWSD),数据时间:2010 年	土壤侵蚀模数的计算
4	地质岩性数据	img 格式,来源:王明章,王尚彦等 <sup>[7]</sup> ,数据时间:2005 年	石漠化空间等级划分及演化敏感性等级划分
5	专题统计数据	xls 格式(统计报表格式,人口密度),来源:《贵州省统计年鉴》 <sup>[8]</sup> ,数据时间:2012 年	石漠化演化敏感性等级划分
6	气象专题数据	xls 格式(统计报表格式,降水数据),来源:气象站点观测,数据时间:2012 年	土壤侵蚀模数计算
7	全国土地利用分类数据	grid 格式(土地分类数据,比例尺 1:100 万),来源:中国科学院自然环境科学数据中心,数据时间:2010 年	石漠化空间等级划分及演化敏感性等级划分

### 1.3 研究方法 with 实验平台

本研究运用 ENVI5.1,对获取的遥感影像进行相关预处理;通过专家打分和层次分析法,对石漠化形成的各影响因子进行权值分析,借鉴通用的石漠化等级划分标准,评价石漠化当前态势,并运用 GIS 空间分析方法,研究贵州省石漠化空间格局;构建贵州省石漠化演化敏感性模型,分析石漠化演化趋势。具体研究技术路线如图 1 所示。图中的 LS、K、R、C、P 因子见 3.1 水土流失数据的计算的内容。

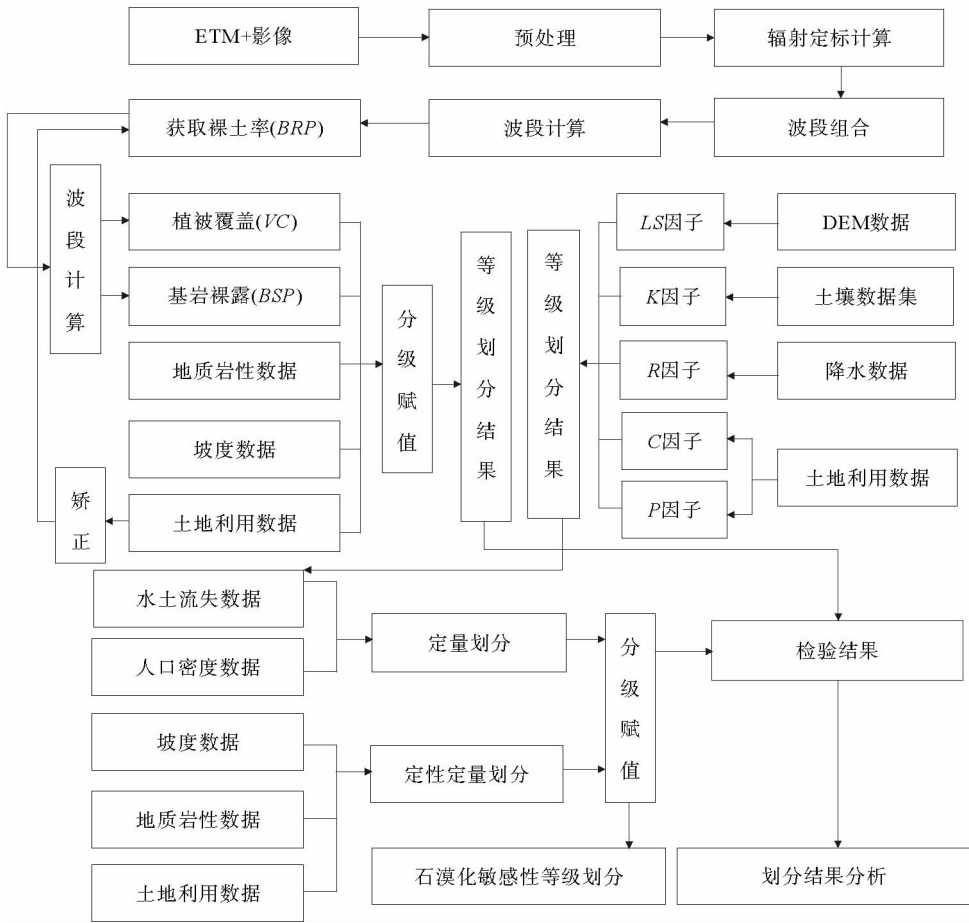


图 1 研究技术路线图

Fig. 1 The flow chart of technology route of the research

## 2 贵州省石漠化空间格局分析

### 2.1 石漠化专题信息提取

石漠化现状信息通过植被覆盖率、基岩裸露率等反映,本研究基于 Landsat ETM+ 影像,运用 FCD 模型 (forest canopy density mapping model) 进行植被覆盖率、基岩裸露率数据的提取<sup>[9-10]</sup>,其计算流程如图 2 所示。



图 2 植被覆盖率、裸露率计算流程图

Fig. 2 The flow diagram of the rate of bare rock calculation and vegetation coverage

主要的计算公式如式(1)~(5)所列。

$$NDVI = \frac{(\rho_4 - \rho_3)}{(\rho_4 + \rho_3)}; \quad (1)$$

$$BI = \frac{(\rho_5 + \rho_3 - \rho_4 - \rho_1)}{(\rho_5 + \rho_3 + \rho_4 + \rho_1)}; \quad (2)$$

$$VC = \frac{(NDVI - NDVI_{min})}{(NDVI_{max} - NDVI_{min})}; \quad (3)$$

$$BSP = \frac{(BI_{max} - BI)}{(BI_{max} - BI_{min})}; \quad (4)$$

$$BRP = 1 - A\% - B\%。 \quad (5)$$

其中： $\rho_1 \sim \rho_5$  对应 Landsat ETM+ 影像中 1~5 波段反射率值； $NDVI^{[11]}$  是归一化植被指数； $BI$  是裸土指数； $VC$  是植被覆盖率； $BSP$  是土壤裸露率； $BRP$  是基岩裸露率。

以多光谱遥感影像的像元为基本单元，进行裸岩率的计算，每个像元的裸岩率取值  $0 \sim 100\%$ <sup>[10]</sup>。由于研究区的土地覆被组成大致可分成植被、土壤和岩石 3 大类，因此，在单位面积区域内，若植被覆盖、土壤裸露比值分别为  $A\%$  和  $B\%$  的情况下，则可用式(5)计算得到基岩裸露率。

## 2.2 石漠化程度空间等级划分模型的构建

### 2.2.1 数据预处理

利用 ENVI5.1 软件，对 Landsat ETM+ 影像进行辐射定标、大气纠正和拼接、裁切等处理；利用遥感数据、土壤类型数据、DEM 等<sup>[13]</sup>数据，对土地进行投影变换、裁切等处理；利用 ArcGIS，将贵州省岩性分布图进行矢量化、栅格化(图 4(a))；通过 Excel，对气象站点数据及《统计年鉴》等数据进行整理<sup>[14]</sup>；最后，在 ArcGIS 中对其进行插值分析及裁切等处理。

### 2.2.2 石漠化强度等级划分模型的构建

利用 3.1 方法得到  $VC$ 、 $BSP$  计算结果如图 3(a)、3(b) 所示。结合已有对石漠化等级评价及划分成果<sup>[14-16]</sup>，选取 5 个贵州省石漠化强度评价和划分指标：地形坡度、土地覆被类型、植被覆盖度、基岩裸露率及地质岩性分布。按照表 2 所列等级划分标准，对石漠化各影响因子进行分级赋值。

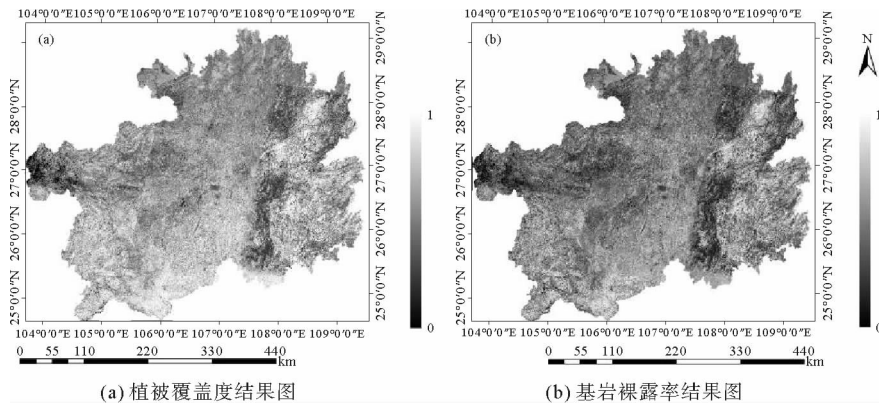


图 3 贵州省植被覆盖度、基岩裸露率结果图

Fig. 3 The distribution map of vegetation coverage and percentage of bare rock in Guizhou province

表 2 石漠化各因子分级赋值表

Tab. 2 The grading assignment of rocky desertification impact factors

坡度值/度	<5°	5°~15°	15°~25°	25°~35°	>35°		
植被覆盖度	0.7	0.5~0.7	0.35~0.5	0.2~0.35	<0.2		
基岩裸露率	<0.1	0.1~0.3	0.3~0.5	0.5~0.7	>0.7		
分级赋值	1	3	5	7	9		
土地覆被	人工表面、湿地、水田、沙地	森林	灌木林	旱地、园地	草地、稀疏植被	裸岩	
分级赋值	0.2	1	2	5	7	9	
岩性	碎屑岩	白云岩夹碎屑岩组合	灰岩碎屑岩互层	灰岩夹碎屑岩组合	灰岩白云岩混合岩类	连续型白云岩	连续型石灰岩
分级赋值	0.1	3	5	6	7	9	10

利用 ArcGIS 中空间分析工具及表 3, 建立石漠化等级划分模型, 模型中利用式(6)计算贵州省石漠化数据。其中,  $C_g$  为空间的单元石漠化指标度;  $D_g$  为因子的石漠化等级值。石漠化等级划分结果如图 4 所示。

$$Dg = \sqrt[5]{\prod_{g=1}^5 Cg} \quad (6)$$

表 3 石漠化等级划分表

Tab. 3 The classification of desertification based on the value

$D_g$ 值的范围	划分的等级
$0 < D_g < 3$	无石漠化地区
$3 < D_g < 5$	轻度石漠化地区
$5 < D_g < 7$	中度石漠化地区
$7 < D_g < 8$	重度石漠化地区
$8 < D_g < = 10$	极度石漠化地区

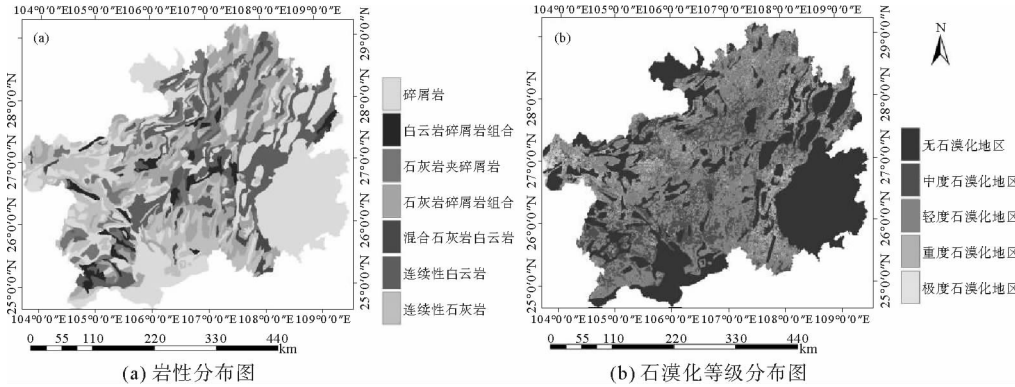


图 4 贵州省岩性分布、石漠化等级划分结果图

Fig. 4 The distribution map of lithology and desertification in Guizhou province

### 2.3 基于石漠化等级划分空间格局分析

由图 4(b)看出, 贵州省已有 50% 以上土地出现石漠化; 无石漠化和石漠化不明显地区所占总面积的 33.4%, 主要分布在贵州省东南和西北部。与熊康宁等<sup>[17]</sup>对贵州省石漠化分布的研究成果较为吻合。石漠化多分布在贵州省西部、西南部以及南部一些地区; 其中, 贵州东北、北、西部为轻度石漠化地区; 贵州西北、中部为中度石漠化地区; 贵州东南、西南部为强度石漠化地区; 贵州东南、西南部为强度石漠化地区; 西部少数极度石漠化地区。除大面积非喀斯特地区, 发生石漠化地区基本上与喀斯特地区范围吻合, 且呈连续分布状态。石漠化空间格局出现从南向北、从西向东程度呈逐渐降低的趋势。

## 3 贵州省石漠化演化敏感性分析

### 3.1 水土流失数据的计算

土壤侵蚀能够改变土壤质地, 降低土壤生产能力, 加剧灾害发生, 危害人类生存<sup>[18]</sup>。本研究选取修订的通用土壤侵蚀方程式(revised universal soil loss equation, RUSLE)进行贵州省的土壤侵蚀模数计算<sup>[19]</sup>, 如公式 7 所示:

$$A_r = R \times K \times LS \times C \times P. \quad (7)$$

式中,  $A_r$  为土壤侵蚀量,  $R$  为降雨侵蚀力因子,  $K$  为土壤侵蚀力因子,  $LS$  为坡度坡长因子,  $C$  为植被覆盖与管理因子,  $P$  为水土保持量因子; 各个因子的计算方法参照已有计算方法<sup>[19-21]</sup>。得到的贵州省的土壤侵蚀计算结果如图 5(a)所示。

### 3.2 石漠化演化敏感性等级划分模型的构建

石漠化演化敏感性是监测易发生石漠化区域和衡量石漠化对人类活动敏感程度的重要指标, 演化敏感性是多个因素共同作用的结果。本研究选取土地利用类型、岩性、植被覆盖度、水土流失、坡度和人口密度等作为评价石漠化演化敏感性指标。表 4 所列内容为各因子分级情况。运用 ArcGIS 空间建模, 计算得到贵州省石漠化演化敏感性等级划分结果, 如图 5(b)所示。

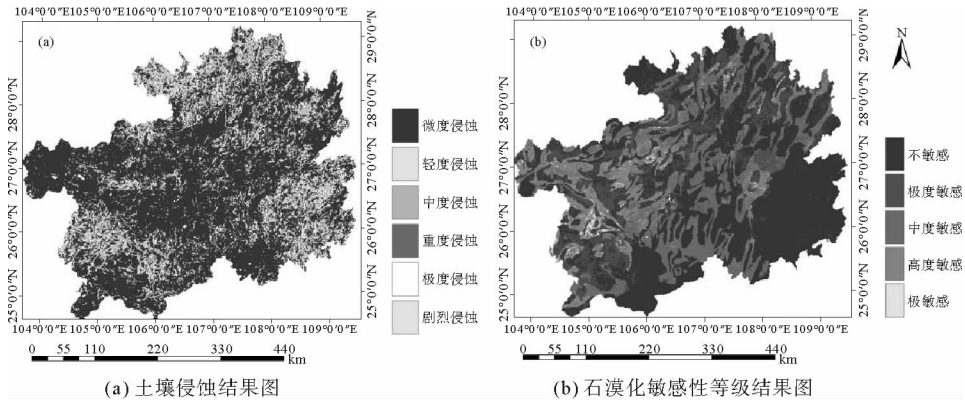


图 5 贵州省土壤侵蚀、石漠化敏感性等级结果图

Fig. 5 The resulting map of soil erosion and rock evolved sensitivity

表 4 石漠化演化敏感性指标表

Tab. 4 The index table of the rock desertification evolved sensitivity

敏感性	不敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感	极敏感
岩性	非碳酸盐岩	碳酸盐岩类夹非碳酸盐岩	碳酸盐岩	碳酸盐岩	碳酸盐岩
坡度	$< 8^\circ$	$8^\circ \sim 15^\circ$	$15^\circ \sim 25^\circ$	$25^\circ \sim 35^\circ$	$> 35^\circ$
植被覆盖率	$> 70$	50~70	30~50	10~30	$< 10$
土地利用	有林地、水域	水田、建筑用地	灌木林地、疏林地、高覆盖度草地	中覆盖度草地、坡耕地	低覆盖度草地、裸岩石地、 $> 25^\circ$ 坡耕地
水土流失	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	强度侵蚀	极强度侵蚀、剧烈
人口密度(人/ $\text{km}^2$ )	$< 50$	50~100	100~150	140~200	$> 200$

### 3.3 基于石漠化演化敏感性的空间格局分析

由图 5(b)可以看出,贵州省已有 50%以上地区为石漠化敏感地区,且大多集中在轻度敏感和中度敏感区,石漠化不敏感地区面积约 1/3。石漠化敏感区大多集中在西部、西北部河流密集且多山地区,以及北部和西北部地貌复杂区。总体上,敏感区和不敏感区与贵州省的岩性分布特点相似,高度及极度敏感地区分布在西部地貌复杂区,这些地区恰好是石漠化最严重的地区。

### 3.4 石漠化分布现状与演化敏感性的关联分析

分析图 4(b)和图 5(b)发现,不敏感地区和无石漠化地区的空间分布相似程度很高,轻度石漠化地区和轻度敏感性空间分布基本吻合,中度石漠化地区和中度石漠化敏感地区相似度较高;重度敏感地区及极度敏感地区同重度石漠化及极度石漠化也有较高相似度。为便于比较,本研究对石漠化等级和敏感性评价结果进行面积统计和等级比较,如图 6 所示。综上分析,石漠化敏感性程度高的地区也是目前石漠化程度高的区域,分布面积基本一致,因此,石漠化等

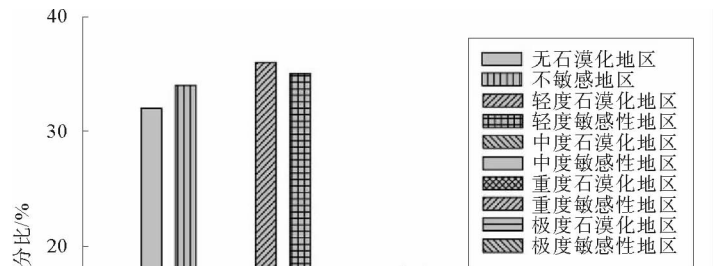


图 6 统计结果比较图

Fig. 6 The comparison of the statistical results



级强度与石漠化演化敏感性具有较强相关性。

## 4 结论与讨论

通过上述研究得出以下结论:

1) 建立石漠化等级划分模型和石漠化演化敏感性等级划分模型,得到石漠化空间等级分布结果以及贵州省石漠化分布规律。

2) 完成贵州省石漠化演化敏感性分布评价,对石漠化演化敏感性结果进行分析,得到石漠化基本演化方向和趋势。

3) 基于石漠化等级划分结果和演化敏感性等级划分结果,得到石漠化空间分布差异和石漠化演化敏感性间的空间关系。

4) 本研究成果适用于较大空间范围的石漠化现状和演化敏感性空间信息的获取及分析,有助于全面把握石漠化现状以及石漠化演化机制,便于监测和管理,可针对性建立治理方案。

综上,利用 GIS 和 RS 技术实现对石漠化的空间分布以及石漠化演化敏感性分析,不仅是一种实用可行的方法,而且提高了环境工作者进行监测的效率,能够为决策者对石漠化问题的防治、环境保护以及环境建设等提供科学依据。

### 参考文献:

- [1]王世杰.喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵探讨[J].中国岩溶,2002,21(2):100-105.  
WANG Shijie. Concept deduction and its connotation of Karst rocky desertification[J]. Carsologica Sinica,2002,21(2):100-105.
- [2]王培彬,安裕伦.2000~2010年贵州喀斯特地区石漠化时空特征分析[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2014,32(3):10-16.  
WANG Peibin, AN Yulun. Spatial-temporal analysis of rocky desertification in Guizhou province during 2000-2010[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Science),2014,32(3):10-16.
- [3]蓝安军,熊康宁,安裕伦.喀斯特石漠化的驱动因子分析:以贵州省为例[J].水土保持通报,2001,21(6):9-23.  
LAN Anjun, XIONG Kangning, AN Yulun. Analysis on driving factors of Karst rocky desertification with a special reference to Guizhou province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2001,21(6):19-23.
- [4]肖丹,熊康宁,兰安军,等.贵州省绥阳县喀斯特石漠化分布与岩性相关性分析[J].地球与环境,2006,34(2):77-81.  
XIAO Dan, XIONG Kangning, LAN Anjun, et al. Correlation analysis between Karst rocky desertification and lithology in Suiyang county, Guizhou province[J]. Earth and Environment,2006,34(2):77-81.
- [5]胡宝清,廖赤眉,严志强,等.基于RS和GIS的喀斯特石漠化驱动机制分析:以广西都安瑶族自治县为例[J].山地学报,2004,22(5):583-590.  
HU Baoqing, LIAO Chimei, YAN Zhiqiang, et al. Diving mechanism diagnosis of Karst rocky desertification in Du'an Yao autonomous county of Guangxi based on RS and GIS[J]. Journal of Mountain Science,2004,22(5):583-590.
- [6]兰安军,文锡梅,吴保国.栅格数据空间分析在喀斯特石漠化敏感性评价中的应用:以贵州省开阳县为例[J].安徽农业科学,2010,38(2):827-839.  
LAN Anjun, WEN Ximei, WU Baoguo. Application of raster data spatial analysis in the sensitivity assessment of Karst rocky desertification[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2010,38(2):827-839.
- [7]王明章,王尚彦,杨秀忠,等.贵州岩溶石山生态地质环境研究[M].北京:地质出版社,2005:17.
- [8]贵州省统计局.贵州统计年鉴2012[M].北京:中国统计出版社,2012.
- [9]江洪,王小钦,陈星.一种以FCD模型从SPOT影像提取植被覆盖率的方法[J].地球信息科学,2005,7(4):113-116.  
JIANG Hong, WANG Xiaoqin, CHEN Xing. A method for abstraction of vegetation density from SPOT image[J]. Geo-information Science,2005,7(4):113-116.
- [10]张盼盼,胡远满,肖笃宁,等.一种基于多光谱遥感影像的喀斯特地区裸岩率的计算方法初探[J].遥感技术与应用,2010,25(4):510-513.  
ZHANG Panpan, HU Yuanman, XIAO Duning, et al. A method of the percentage of bare rock calculation in Karst areas based on multi-spectrum remote sensing image[J]. Remote Sensing Technology and Application,2010,25(4):510-513.

- [11]孙林,田信鹏,于会泳,等. Landsat8 OLI 城市地区气溶胶光学厚度遥感反演[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2015,34(5):47-55.  
SUN Lin, TIAN Xinpeng, YU Huiyong, et al. Remote sensing inversion of aerosol optical depth from Landsat 8 OLI over the urban area[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2015, 34(5): 47-55.
- [12]凡非得,王克林,宜勇,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.  
FAN Feide, WANG Kelin, YI Yong, et al. Eco-environmental sensitivity and its spatial distribution in Karst regions, Southwest China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(11): 1394-1399.
- [13]朱红春,刘海英,汤国安,等. DEM 地形信息因子的量化关系模拟:以陕西黄土高原的实验为例[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2006,25(2):16-19.  
ZHU Hongchun, LIU Haiying, TANG Guoan, et al. Quantitative simulation of topographic factors from DEMs: A case study in the Loess plateau of North Shaanxi province[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2006, 25(2): 16-19.
- [14]张文源,王百田. 贵州喀斯特石漠化分类分级探讨[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2015,39(2):148-154.  
ZHANG Wenyuan, WANG Baitian. Discussion on classification and gradation of Karst rocky desertification in Guizhou province[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2015, 39(2): 148-154.
- [15]李瑞玲,王世杰,熊康宁,等. 喀斯特石漠化评价体系探讨:以贵州省为例[J]. 热带地理,2004,24(2):145-149.  
LI Ruiling, WANG Shijie, XIONG Kangning, et al. A study on rocky desertification evaluation index system: A case study of Guizhou province[J]. Tropical Geography, 2004, 24(2): 145-149.
- [16]许月卿,邵晓梅. 基于 GIS 和 RUSLE 的土壤侵蚀量计算:以贵州省猫跳河流域为例[J]. 北京林业大学学报,2006,28(4):67-71.  
XU Yueqing, SHAO Xiaomei. Estimation of soil erosion supported by GIS and RUSLE: A case study of Maotiaohe watershed, Guizhou province[J]. Journal of Beijing Forest University, 2006, 28(4): 67-71.
- [17]熊康宁,黎平,周忠发,等. 喀斯特石漠化的遥感:GIS 典型研究[M]. 北京:地质出版社,2002:17-18.
- [18]王万忠,焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J]. 水土保持通报,1996,16(5):1-20.  
WANG Wanzhong, JIAO Juying. Quantitative evaluation on factors influencing soil erosion in China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1996, 16(5): 1-20.
- [19]张照录,崔继红. 通用土壤流失方程最新研究改进分析[J]. 地球信息科学,2004,6(4):51-55.  
ZHANG Zhaolu, CUI Jihong. Analysis of the latest research and improvement of universal soil loss equation[J]. Geo-information Science, 2004, 6(4): 51-55.
- [20]刘宝元,张科利,焦菊英. 土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用[J]. 自然资源,1999,14(4):345-350.  
LIU Baoyuan, ZHANG Keli, JIAO Juying. Soil erodibility and its use in soil erosion prediction model[J]. Journal of Natural Resources, 1999, 14(4): 345-350.
- [21]ALEJANDRO M A, KENJI O. Estimation of vegetation parameter for modeling soil erosion using linear spectral mixture analysis of Landsat ETM data[J]. Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2007, 62: 309-324.

(责任编辑:高丽华)