

DOI: 10.5846/stxb201806011216

习慧鹏,王世杰,白晓永,唐红,吴路华,陈飞,肖建勇,王明明,李汇文,操玥,陈欢,冉晨,罗旭玲.西南典型喀斯特地区石漠化时空演变特征——以贵州省普定县为例.生态学报,2018,38(24):8919–8933.

Xi H P, Wang S J, Bai X Y, Tang H, Wu L H, Chen F, Xiao J Y, Wang M M, Li H W, Cao Y, Chen H, Ran C, Luo X L. Spatio-temporal characteristics of rocky desertification in typical Karst areas of Southwest China: A case study of Puding County, Guizhou Province. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(24): 8919–8933.

## 西南典型喀斯特地区石漠化时空演变特征 ——以贵州省普定县为例

习慧鹏<sup>1,3</sup>, 王世杰<sup>1</sup>, 白晓永<sup>1,\*</sup>, 唐红<sup>1</sup>, 吴路华<sup>1,3</sup>, 陈飞<sup>1,2</sup>, 肖建勇<sup>1,2</sup>, 王明明<sup>1,3</sup>,  
李汇文<sup>1,3</sup>, 操玥<sup>1,3</sup>, 陈欢<sup>1,2</sup>, 冉晨<sup>1,2</sup>, 罗旭玲<sup>1,2</sup>

1 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081

2 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550025

3 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:**为揭示我国西南典型喀斯特地区石漠化时空演变特征,选取贵州省普定县为研究对象,基于 Landsat、DEM 等影像数据,提取了坡度和 4 期植被覆盖度、岩石裸露率分布图,并利用地理探测器获得各自的贡献率,反演了 1990—2015 年 4 期石漠化空间分布信息,进而讨论了石漠化时空演变特征。结果表明:(1)在 1990—2015 年间,普定县石漠化演变复杂,经历了由好转到恶化再到好转的阶段,总体趋势在好转,局部恶化,石漠化治理仍需加大力度;(2)中度以上石漠化集中分布在三岔河沿岸附近,轻度以下石漠化则分布较散乱;(3)潜在和轻度石漠化演变方向复杂,潜在石漠化平均变化速率最大(2.75 km<sup>2</sup>/a),在 1997—2006 年间更是达到了 16.5 km<sup>2</sup>/a;(4)植被覆盖度与岩石裸露率的变化主要呈负相关,前者的增加主导了石漠化的好转,而后的增加则控制了石漠化的恶化;(5)石漠化演变存在突变,在三岔河沿岸附近,存在无/潜在石漠化突变为重度以上石漠化的现象;在靠近城乡居民地附近,存在重度以上石漠化突变为无/潜在石漠化的现象;(6)植被覆盖度、岩石裸露率、坡度能较准确反演石漠化,贡献率分别为 44%、42%、14%。本文提供的石漠化反演方法快速高效,制作的图件、数据为同行提供了参考,得出的结论为石漠化治理提供了科学支撑。

**关键词:**石漠化; normalized difference rock index; 地理探测器; 时空演变

## Spatio-temporal characteristics of rocky desertification in typical Karst areas of Southwest China: A case study of Puding County, Guizhou Province

XI Huipeng<sup>1,3</sup>, WANG Shijie<sup>1</sup>, BAI Xiaoyong<sup>1,\*</sup>, TANG Hong<sup>1</sup>, WU Luhua<sup>1,3</sup>, CHEN Fei<sup>1,2</sup>, XIAO Jianyong<sup>1,2</sup>,  
WANG Mingming<sup>1,3</sup>, LI Huiwen<sup>1,3</sup>, CAO Yue<sup>1,3</sup>, CHEN Huan<sup>1,2</sup>, RAN Chen<sup>1,2</sup>, LUO Xuling<sup>1,2</sup>

1 Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

2 College of Geography and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** To reveal the spatiotemporal evolution characteristics of rocky desertification in the typical Karst region of Southwest China, we selected Puding County of Guizhou Province as the research subject. Based on Landsat and DEM image data, we extracted the Slope and the four-stage Fractional Vegetation Coverage and the Rock exposedness rate

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0502102);中国科学院科技服务网络计划(KFJ-STZ-ZDTP-036);“西部之光”人才培养计划(A类)(〔2018〕X);贵州省科技计划(2017-2966)

收稿日期:2018-06-01; 修订日期:2018-11-12

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: baixiaoyong@126.com

<http://www.ecologica.cn>

distribution map; then, we used geo-detectors to obtain their respective contribution rates, and retrieved the spatial distribution information for the four stages of rocky desertification in 1990—2015. Finally, we discussed the temporal and spatial evolution of characteristics of rocky desertification. The results showed that: (1) In the period of 1990—2015, the evolution of rocky desertification in Puding County was complex, it ranged from good to deterioration and then back to improvement, but the overall trend was improving with local deterioration, so the control of rocky desertification still needs to be intensified; (2) Moderate rocky desertification was concentrated in the vicinity of the Sancha River, and the light rocky desertification was distributed. (3) The evolution direction of potential and light rocky desertification were complex, the average change rate of potential rocky desertification was a maximum of  $2.75 \text{ km}^2/\text{a}$ , reaching  $16.5 \text{ km}^2/\text{a}$  in 1997—2006; (4) Fractional Vegetation Coverage was negatively correlated with the change in Rock exposedness. The increased Fractional Vegetation Coverage led to the improvement of rocky desertification, whereas the increased of Rock exposedness controlled the deterioration of rocky desertification; (5) There was a sudden change in the evolution of rocky desertification, and there was no/potential rocky desertification change to severe rocky desertification near the coast of the Sancha River. Near the urban and rural areas, there was a severe rocky desertification change to no/potential rocky desertification; (6) Fractional Vegetation Coverage, Rock exposedness, and Slope can be used to accurately retrieve rocky desertification, and the contribution rate was 44%, 42%, and 14%, respectively. The inversion method of rocky desertification provided in this paper is fast and efficient, the drawings or data are provided for reference, and the conclusions can provide scientific support for the control of rocky desertification.

**Key Words:** karst rocky desertification; normalized difference rock index; geo detector; spatiotemporal evolution

中国南方喀斯特地区存在着非常严重的石漠化问题<sup>[1-3]</sup>,在此地区的自然灾害和贫穷发生率极高,严重制约着该地区的发展。目前,研究其空间演变规律已成为治理石漠化的重要前提,以往学者利用不同方法分析了石漠化的空间演变规律:熊康宁等基于 2000 年 Landsat TM 影像和实际调查数据,将贵州省石漠化分为 6 级并探讨了贵州省石漠化的现状及其空间演变趋势<sup>[4]</sup>;胡宝清等基于 2000 年 TM 影像提取了广西省石漠化信息,并利用数理统计等方法探讨了石漠化的分布演变规律,得出了人类活动是石漠化产生的主要原因<sup>[5]</sup>;白晓永等基于 1986、1995、2000 年 3 期贵州省石漠化数据,利用转移矩阵等方法探讨了贵州省石漠化的时空演变规律<sup>[6]</sup>。可以看出,以往的研究多基于实际数据和数理统计的方法综合分析,所取得的成果对早期的石漠化治理提供了巨大的科技支撑,然而研究方向多集中于省域级大尺度低空间分辨率上,且研究年限多在 20 世纪 80 年代—21 世纪初,所取得的研究成果和经验方法对已治理了 20 余年的石漠化指导意义不足。

此外,如何快速高效地获取石漠化各因子的贡献率一直是众多学者的研究重点,在以往研究中学者们通过数学分析的手段总结出了很多经典的方法。蓝安军等基于主成分分析、相关性分析,并建立了有关石漠化的动力指数公式,对贵州省的石漠化众多影响因子分析得出了包括植被覆盖度、喀斯特面积、河网密度、耕地、未利用地、草地、海拔、土地开垦率和  $25^\circ$  以上的土地面积等 9 个因子是导致石漠化产生的驱动因素<sup>[7]</sup>;胡宝清等基于主成分分析,主要分析了岩性、地貌、水热条件、土壤和 NDVI 等 5 个指标,计算得到石漠化地质背景区的环境生态指数回归模型<sup>[8]</sup>;皇甫江云等基于专家打分的方法,对各等级石漠化对应的影响因子归类打分,得出草地石漠化中各因子的贡献率<sup>[9]</sup>。可以看出,以往的经典方法受人为影响较大,且由于喀斯特环境的复杂性,石漠化影响因子回归模型无法推广。

因此,针对以往研究中存在的两大问题,本文选取贵州省中部典型喀斯特地区普定县为研究区,基于 Landsat、DEM 等 30 m 分辨率数据,提取了植被覆盖度、岩石裸露率和坡度等 3 个最具代表性的指标来精确反演石漠化<sup>[10-12]</sup>,旨在解决以下 3 个问题:(1) 寻找更加高效快速的石漠化模拟反演方法。(2) 引入地理探测器,采用更科学的方法确定各因子的贡献率。(3) 研究各等级石漠化分布规律,分析新形势下贵州典型喀斯特地区的石漠化演变速率,揭示石漠化的时空演变特征(技术路线见图 4)。研究结果中获得的各因子贡献率

为反演石漠化提供了参考,发现的石漠化分布演变规律为石漠化治理提供了方向。

### 1 研究区与数据源

#### 1.1 研究区概况

位于贵州省中西部地区的普定县(图1),全县国土面积约 1081.8 km<sup>2</sup>,喀斯特面积为 869.64 km<sup>2</sup>,年均降水量约 1200 mm,年均温 15.3℃,平均海拔为 1100 m,地势南北高,中间低。截止 2013 年,普定县人口密度达到 440 人/km<sup>2</sup>,远远高于我国西部其他地区。由于岩溶地貌的广泛发育,石灰土比重占到了 63%,连年的高强度降水和人类活动,使得普定县石漠化极为严重。2008 年,普定被确定为全国 100 个、全省 55 个石漠化综合治理试点县,众多科研单位在此地区开展石漠化治理工作,普定县成为了石漠化防治研究的典型地区。

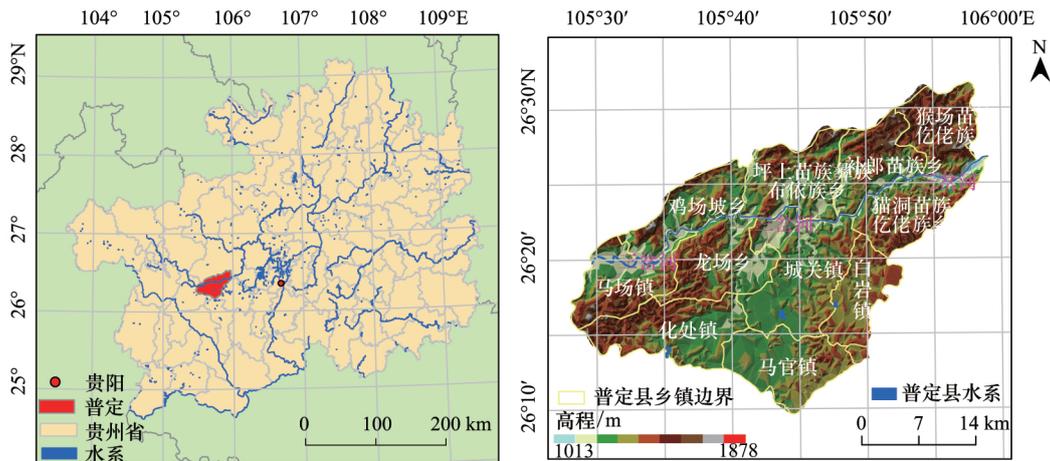


图 1 研究区位置图,左图为研究区在贵州省的位置,右图为生成的普定县 TIN(triangular irregular network)

Fig.1 Location map of the study area

#### 1.2 数据源

本研究使用的实验数据主要包括:普定县岩性图、普定县石漠化分布图、Landsat TM/ETM+、DEM 等 30 m 空间分辨率数据,具体见表 1。

表 1 主要数据源  
Table 1 The main data and their sources

数据类型 Data type	数据源 Data source	网址 Website
普定县岩性分布图 The lithology map	喀斯特科学数据中心	http://www.karstdata.cn/
普定县石漠化分布图 Distribution map of rocky desertification	喀斯特科学数据中心	http://www.karstdata.cn/
Landsat TM/ETM+ DEM	地理空间数据云	http://www.gscloud.cn/

### 2 研究方法

#### 2.1 石漠化指标

##### 2.1.1 岩石裸露率

岩石裸露作为石漠化地区最显著的特征,在石漠化信息的提取中有着至关重要的作用,本文拟采用 NDRI 来获取研究区岩石裸露率,NDRI(Normalized Difference Rock Index)是指归一化岩石指数,基于喀斯特碳酸盐岩的光谱信息在短波红外波段具有较大差异<sup>[13-14]</sup>,基于 NDVI 思想,在 ENVI 5.2 软件下进行波段运算,根据公式(1)得到研究区的 NDRI:

$$NDRI = \frac{Band5 - Band3}{Band5 + Band3} \quad (1)$$

http://www.ecologica.cn

根据像元二分模型原理,假设像元由岩石裸露和非裸露两部分组成,根据 NDRI 计算得到基岩裸露率(Fr):

$$Fr = \frac{NDRI - NDRI_r}{NDRI_r - NDRI_o} \quad (2)$$

式中,NDRI<sub>r</sub>为全由岩石裸露得到的像元值,NDRI<sub>o</sub>为全无岩石裸露得到的像元值。在统计得到的所有像元值中,取频率1%的像元值为NDRI<sub>o</sub>,取累计频率为99%的像元值为NDRI<sub>r</sub>。

### 2.1.2 FVC(Fractional Vegetation Cover)

FVC 植被覆盖度指的是植被冠层在地面的垂直投影面积与所处地总面积之比<sup>[15-16]</sup>,同样根据像元二分模型原理,本文拟采用 NDVI 来获取研究区植被覆盖度,公式如下:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_r}{NDVI_r - NDVI_o} \quad (3)$$

在计算得到像元的 NDVI 值后,统计其百分比,取1%的像元值为NDVI<sub>o</sub>,作为没有植被存在的像元值,取99%的像元值为NDVI<sub>r</sub>,作为完全由植被覆盖的像元值。

### 2.1.3 Slope

本文选择的 DEM 数据为 GDEMDEM 30 m 分辨率数字高程数据,数据标识为 ASTGTM\_N26E105,在 ArcGIS 下对其进行投影转换为 ALBERS 等面积投影,坐标系为 Krasovsky\_1940\_Albers,掩膜提取后制作得到坡度图。

## 2.2 贡献率获取

地理探测器是探测和利用空间分异性的工具<sup>[17]</sup>,在空间一致的情况下,通过采集样本点上各自变量和因变量的值,可以利用公式计算自变量对因变量的解释能力大小,公式表达式为:

$$Q_{xy} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^h N_i \delta_i^2}{N \delta^2} \quad (4)$$

式中  $x$  为自变量,即 NDRI、FVC、slope 等因子等级,  $y$  为石漠化等级。 $N$ 、 $N_i$  分别为因变量和自变量的样本点总数,  $\delta^2$ 、 $\delta_i^2$  分别为  $y$  和  $x$  的栅格值方差,  $i$  和  $h$  分别为第  $i$  类因子等级及其等级总数,  $Q$  值取值在 0—1 之间,值越大说明自变量  $x$  对因变量  $y$  的解释能力越强。为快速准确地获取贡献率,采用自然间断法将自变量分为 10 级,在 ArcGIS 10.2 中以 500 m 为间距均匀布点,并且布点位置仅在已发生石漠化区域,石漠化影像裁切于喀斯特科学数据中心 2000 年贵州省石漠化分布图(图 2),各因子等级分布图由 2001 年 Landsat 遥感影像获得(图 3)。

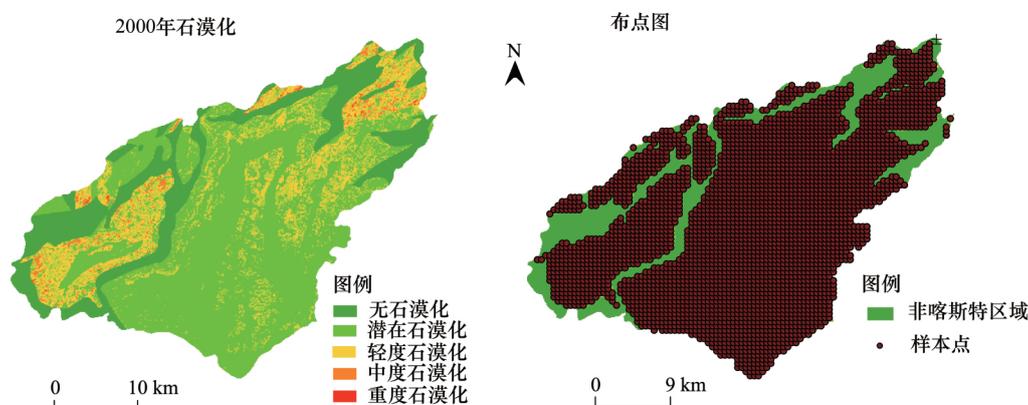


图 2 2000 年石漠化及其布点图

Fig.2 Karst rocky desertification and its site map in 2000

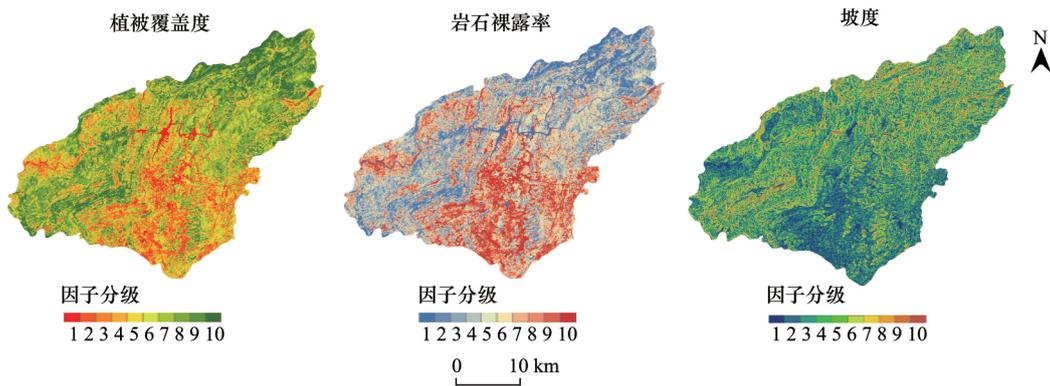


图3 各因子十级分布图

Fig.3 Ten level distribution map of each factor

### 2.3 石漠化分类定级标准

基于前人工作建立石漠化分级分类标准<sup>[10, 18-21]</sup>(表2),通过地理探测器得到各因子贡献率之后,在ArcGIS 10.2 软件平台下按照下表进行重分类,并叠置分析,基于普定县岩性图和土地分类结果剔除非喀斯特地区和水体、城乡建设等不可能发生石漠化的地方,得到石漠化空间分布图。

表2 石漠化分类定级标准

Table 2 Classification criteria for rocky desertification

编号 Number	等级 Rank	岩石裸露率/% Rock exposedness	植被覆盖度/% Fractional vegetation coverage	坡度 Slope
1	无石漠化	<20	>70	<5°
2	潜在石漠化	20—30	50—70	5°—8°
3	轻度石漠化	30—50	30—50	8°—15°
4	中度石漠化	50—70	20—30	15°—25°
5	重度石漠化	70—90	10—20	25°—35°
6	极重度石漠化	> 90	<10	>35°

### 2.4 石漠化空间动态变化分析

石漠化动态变化无论是在时间上还是在空间上都是一个复杂的过程,传统的数字分析表达能力欠佳,因此本文在探讨石漠化时空演变时将数学模型与制图综合在一起,旨在探讨以下科学问题:第一是明确石漠化因子的变化特征,以探讨因变量对自变量的影响大小;第二是明确石漠化的转移方向;第三是明确各等级石漠化的转移快慢。因此,有必要对石漠化的因子变化和时空转变分别构建模型讨论。

#### 2.4.1 石漠化因子变化

本文中石漠化的影响因子主要由植被覆盖度、岩石裸露率、坡度等组成,而坡度由于变化较小无法捕捉,故不在此讨论。在石漠化演变过程中,像元中的植被覆盖度和岩石裸露率等级必然也在发生着变化,因此,两者的变化必然与石漠化演变具有密切关系,基于此,构建下述公式:

$$Q = q_1 - q_2 \quad (5)$$

式中  $Q$  指两个不同年份的因子在栅格计算器下相减后的值,  $q_1$  指一段时间内该像元变化前的等级,  $q_2$  指变化后的等级。

#### 2.4.2 石漠化转移矩阵

在某一时间段内,石漠化的演变方向与演变规模大多较复杂,且时常因地而异,因此需要量化地讨论以明确其大致的演变方向和趋势,构建转移变化矩阵。

$$S_{m,n} = \begin{bmatrix} S_{1,1} & S_{1,2} & \dots & S_{1,k} \\ S_{2,1} & S_{2,2} & \dots & S_{2,k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{k,1} & S_{k,2} & \dots & S_{k,k} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中,  $S$  为面积, 单位为  $\text{km}^2$ ;  $m, n$  为一段时期内前期和末期石漠化的等级;  $S_{k,k}$  为在该时期内石漠化的转移面积, 单位为  $\text{km}^2$ 。

### 2.4.3 石漠化转移变化速率

仅仅探讨石漠化的转移方向和面积对于治理石漠化的指导意义是远远不够的, 石漠化的演变快慢反映了一种类型石漠化在该地区的变化发展模式, 在横向比较上更具有科学价值, 也更能说明石漠化的演变情况。因此需要建立模型以探讨石漠化的演变速率。

$$P_i = \frac{S_2 - S_1}{T} \quad (7)$$

式中  $P_i$  为某一类型的石漠化演变速率, 单位为  $\text{km}^2/\text{a}$ ;  $S_2$  为一定时间段内末期的面积,  $S_1$  为前期的面积, 单位为  $\text{km}^2$ ;  $T$  为该时间段, 单位为  $\text{a}$ 。

### 2.5 技术路线

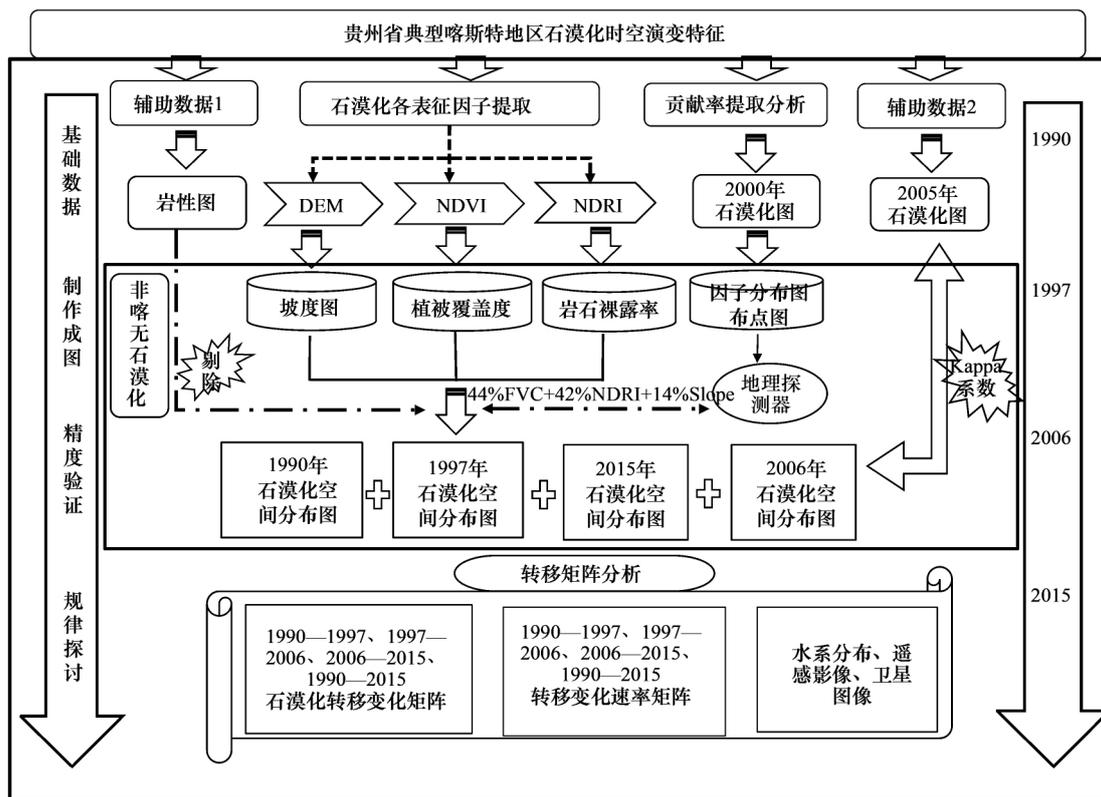


图4 技术路线图

Fig.4 Technical roadmap

## 3 结果与分析

### 3.1 权重分析

在地理探测器中根据石漠化和各因子等级计算得到各自所占的权重, 结果表明, 三个指标中植被覆盖度和岩石裸露率主要控制了石漠化的分布:  $FVC(0.47) > NDRI(0.45) > Slope(0.15)$ , 由于三者相加大于1, 故各因

子权重所占的百分比即为本文中得出的石漠化贡献率: FVC(44%)、NDRI(42%)、Slope(14%) (表3)。

表3 石漠化各因子贡献率

Table 3 The contribution rate of each factor in karst rocky desertification

影响因子 Influence factor	岩石裸露率 Rock exposedness	植被覆盖度 Fractional vegetation coverage	坡度 Slope
$Q$	0.45	0.47	0.15
$P$	0.99	0.99	1
贡献率 Contribution rate / %	44	42	14

$Q$ : 百分比权重,  $q$  quantile;  $P$ : 置信度,  $p$  power

### 3.2 石漠化分布及各因子等级图

按照表2已划分的石漠化等级标准,在ENVI 5.2、ArcGIS 10.2软件下制图分类,得到普定县1990—2015年FVC、NDRI、Slope等级图,并在地理探测器中获得其各自的贡献率,在ArcGIS下叠置分析,并结合Landsat影像,在ENVI下得到土地利用分类图,剔除了水体、城乡建设地等不可能发生石漠化的地区,得到各年份石漠化空间分布图。

#### 3.2.1 NDVI 提取植被覆盖度

首先在ENVI 5.2下波段运算得到的1990—2015不同年份的NDVI,然后再根据公式(3)计算得到植被覆盖度,并在ArcGIS10.2软件下利用Reclassify工具进行重分类,按照表2将其分为>71%、51%—71%、31%—50%、21%—30%、11%—20%、<10%共六类并分别赋值为1、2、3、4、5、6,得到1990—2015年植被覆盖度分布图(图5)。由图中可以看出,越靠近河流和城镇地区,植被覆盖度的等级越低。

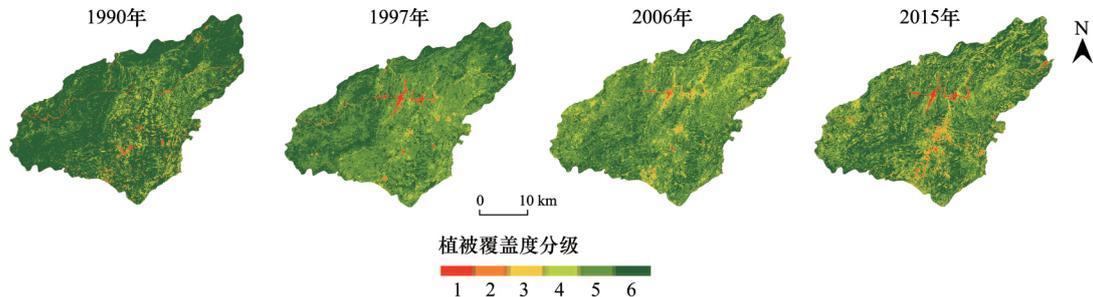


图5 植被覆盖度空间分布

Fig.5 The spatial distribution of fractional vegetation cover

#### 3.2.2 NDRI 提取岩石裸露率

首先根据公式(1),在ENVI 5.2下波段运算得到的1990—2015不同年份的NDRI,再利用公式(2)计算得到岩石裸露率,并在ArcGIS下重分类,将其按照表2分为<20%、21%—30%、31%—50%、51%—70%、71%—90%、>90%共六类并分别赋值为1、2、3、4、5、6,得到1990—2015年岩石裸露率分布图(图6)。由图中可以看出,越靠近河流和城镇地区,岩石裸露率的等级越高,且1997年的岩石裸露面积明显最小。

#### 3.2.3 DEM 提取坡度

在投影变换后,利用ArcGIS软件中的Slope工具根据DEM数据提取坡度,并按照表2的标准,重分类得到普定县坡度空间分布图(图7),由图中可以看出,坡度较陡的区域多沿着普定县SW—NE方向分布,总体呈现出南北坡度大,中部较平坦。

#### 3.2.4 石漠化分布图

在得到各年段的植被覆盖度、岩石裸露率和坡度分布后,利用ArcGIS 10.2中的叠置分析工具,按照地理探测器计算得出的各因子贡献率叠置制图,并剔除非喀斯特地区和水体、城乡建设等不可能发生石漠化的区域,得到1990、1997、2006和2015年的石漠化空间分布图(图8)。

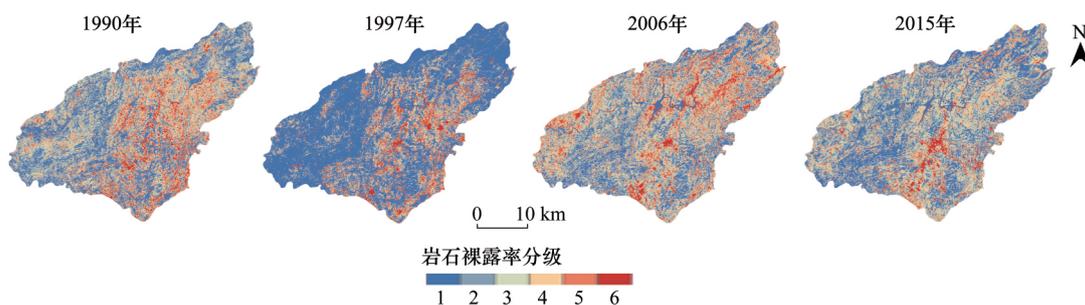


图 6 岩石裸露率空间分布

Fig.6 The spatial distribution of rock exposedness

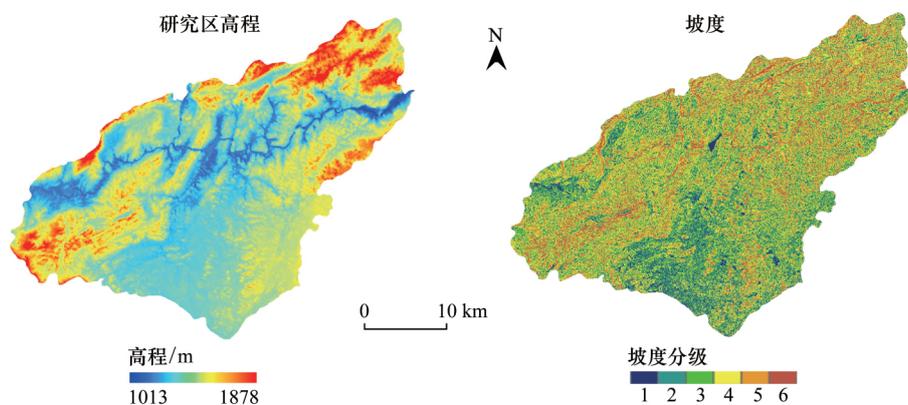


图 7 坡度分布图

Fig.7 The spatial distribution of Slope

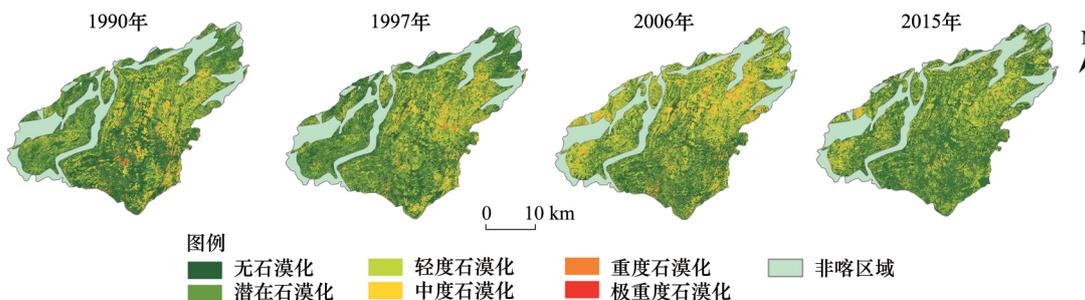


图 8 石漠化空间分布图

Fig.8 The spatial distribution of karst rocky desertification

### 3.2.5 精度验证

为检验反演效果,本文选取了喀斯特科学数据中心提供的 2005 年普定县石漠化实际分布图作为标准,将制作得到的 2006 年数据进行了对比,由图 9 和表 4 可以看出,石漠化在总体上反演精度较高,达到了 80%,该石漠化反演方法可信度较高。

### 3.3 时空演变分析

#### 3.3.1 石漠化面积统计分析

根据石漠化空间分布图,利用栅格计算器计算得到普定县不同年份的各等级石漠化面积,统计如下表 5,可以看出,无石漠化面积占比最大最稳定,而极重度石漠化由于面积小,变化面积不明显,而潜在石漠化、轻度

石漠化和中度以上石漠化的面积在不同年段发生着剧烈地变化。1990—1997 年间,石漠化面积减少了 70.95 km<sup>2</sup>; 1997—2006 年间,石漠化面积增加了 216.45 km<sup>2</sup>; 2006—2015 年间,石漠化面积又减少了 111.05 km<sup>2</sup>; 1990—2015 年间,石漠化面积增加了 34.50 km<sup>2</sup>。综上,普定县轻度以下石漠化分布面积在喀斯特地区均有大量分布,而中度以上多分布在三岔河流域沿岸附近;在 1990—2015 年间,普定县石漠化演变复杂剧烈,经历了由好转到恶化再到好转的阶段,演变总体趋势在好转,但局部在恶化,说明治理石漠化不可掉以轻心,还需要加大治理力度。

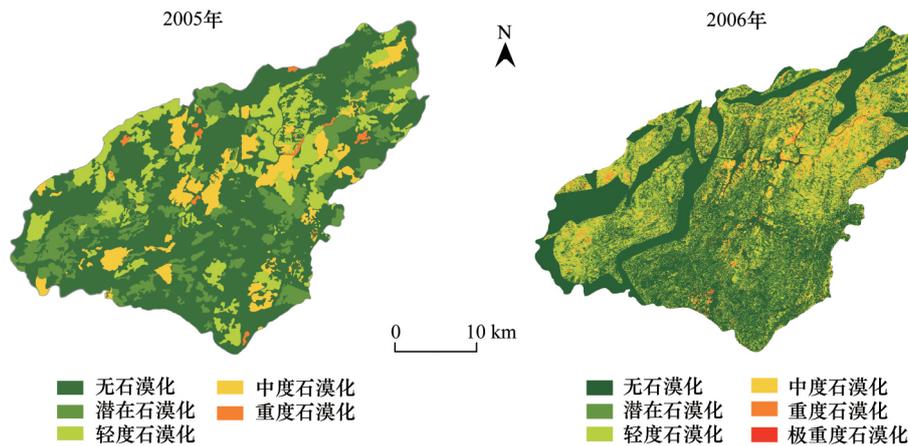


图 9 实际与模拟石漠化对比

Fig.9 Comparison between actual and simulated karst rocky desertification

表 4 石漠化反演精度评价

Table 4 Inversion accuracy evaluation of karst rocky desertification

年份 Year	无石漠化 NKR D	潜在石漠化 PKRD	轻度石漠化 LKR D	中度石漠化 MKRD	重度石漠化 SKRD	已石漠化 KR D
2005 年/km <sup>2</sup>	379.10	164.79	225.57	92.52	7.60	325.69
2006 年/km <sup>2</sup>	306.99	171.23	271.96	100.65	18.80	391.36
精度 Precision/%	80.98	96.24	82.94	91.92	40.53	83

表中石漠化类型均为英文简写, KR D: 石漠化, Karst rocky desertification; NKRD: 无石漠化, No karst rocky desertification; PKRD: 潜在石漠化, Potential karst rocky desertification; LKR D: 轻度石漠化, Light karst rocky desertification; MKRD: 中度石漠化, Moderate karst rocky desertification; SKRD: 重度石漠化, Severe karst rocky desertification

表 5 各级石漠化在喀斯特区域的面积和比例

Table 5 The area and proportion of rocky desertification in Karst area at all levels

年份 Year	Area Proportion	无石漠化 NKR D	潜在石漠化 PKRD	轻度石漠化 LKR D	中度石漠化 MKRD	重度石漠化 SKRD	极重度石漠化 ESKR D
1990	面积/km <sup>2</sup>	327.98	295.78	150.97	74.59	18.53	1.78
	比例/%	37.71	34.01	17.36	8.58	2.13	0.20
1997	面积/km <sup>2</sup>	361.45	333.22	117.68	49.03	7.85	0.4
	比例/%	41.56	38.32	13.53	5.64	0.90	0.05
2006	面积/km <sup>2</sup>	306.99	171.23	271.96	100.65	18.75	0.05
	比例/%	35.30	19.69	31.27	11.57	2.16	0.01
2015	面积/km <sup>2</sup>	343.04	246.23	223.29	50.41	6.52	0.15
	比例/%	39.45	28.31	25.68	5.80	0.75	0.02

ESKR D: 极重度石漠化, Extremely severe karst rocky desertification

### 3.3.2 石漠化因子时空演变分析

根据图 5 以及公式(5) 在 ArcGIS 10.2 软件下运用栅格计算器进行减法运算, 将各年份植被覆盖度相减,

得到 1990—1997、1997—2006、2006—2015、1990—2015 年间的植被覆盖度变化图(图 10),其中,正值表示该地区的植被覆盖度等级在升高,负值则表示在下降。可以看出,1990—1997 年植被覆盖度大都在减少,而在 2006—2015 年却大都在增加,在 1997—2006 年间,植被覆盖度的变化则具有明显的地理位置特征。

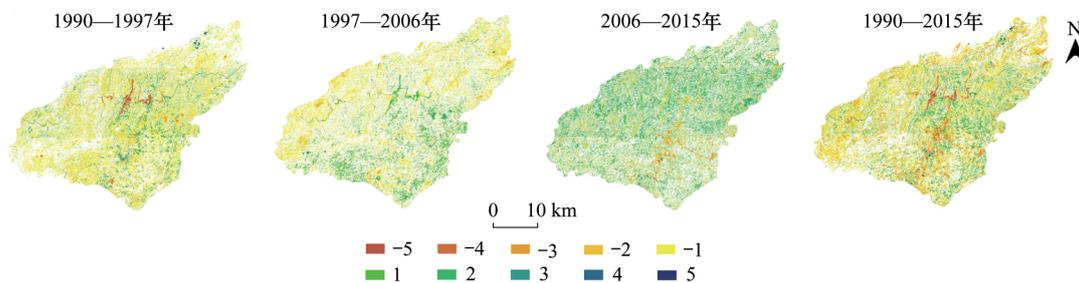


图 10 植被覆盖度时空演变

Fig.10 Fractional vegetation cover changes in each period

再次运用栅格计算器工具,将图 6 中的各年份岩石裸露率相减,得到 1990—1997、1997—2006、2006—2015、1990—2015 年间的变化图(图 11),同样,正值表示该地区的岩石裸露率等级在升高,负值则表示在下降。可以看出,1997—2006 年岩石裸露率等级大都在升高,而在其他年段则大都在降低,结合普定县行政区分析,升高的地区多位于普定县中东部城关镇一带。

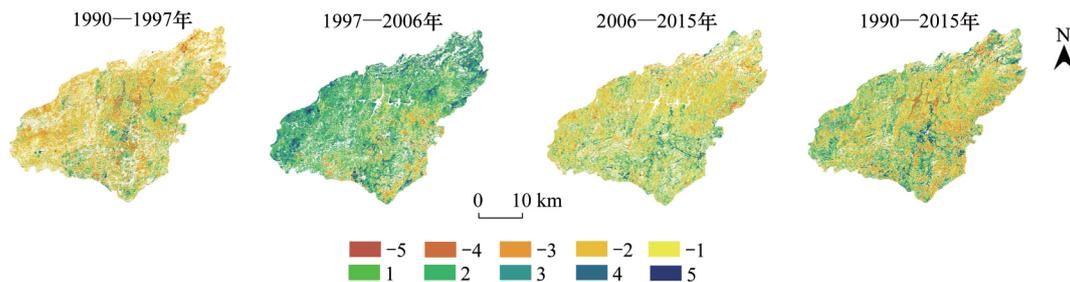


图 11 岩石裸露率时空演变

Fig.11 Rocky exposedness changes in each period

### 3.3.3 石漠化转移变化时空演变分析

根据公式(6)在栅格计算器下通过栅格叠加得到某一年份对应另一年份的石漠化面积,统计结果见图 12(NKRD—无石漠化;PKRD—潜在石漠化;LKRD—轻度石漠化;MKRD—中度石漠化;SKRD—重度石漠化;ESKRD—极重度石漠化;Non—karst:非喀斯特区域)和图 13,可以看出:1990—1997 年,石漠化好转的比例(25.06%)>恶化(16.76%);1997—2006 年,石漠化好转(9.73%)<恶化(37.83%);2006—2015 年,石漠化好转(28.26%)>恶化(14.20%);1990—2015 年,石漠化好转(24.65%)<恶化(25.47%);此外,在图中可以看出由无、潜在石漠化转变为重度以上石漠化的面积虽然不大,但占比极高,结合影像分析(图 14),发现此种演变方式集中于三岔河流域沿岸附近,由于河道拓宽,导致沿岸一带植被减少、基岩裸露率增大,且此地区坡度均较大,是石漠化发生急剧变化的主要原因。而重度以上石漠化转变为无、潜在石漠化面积较少,结合影像分析(图 14),发现此种演变方式多发生于城关镇一带,此处靠近普定县城,且海拔较低,有利于土壤积累,极少部分较为严重的石漠化地区突变为无石漠化或潜在石漠化,笔者认为居民的开垦荒地导致附近的石漠化土地演变为了耕地或林地,因此可以看到人类活动的两面性。

综上,在石漠化演变过程中,轻度以下石漠化演变最为剧烈,尤其是潜在石漠化和轻度石漠化,演变面积大,方向难测;石漠化的演变方式因地制宜,在靠近河流沿岸地区,石漠化常发生突变而恶化,而在城乡居住地附近,常发生重度石漠化突变为无石漠化。

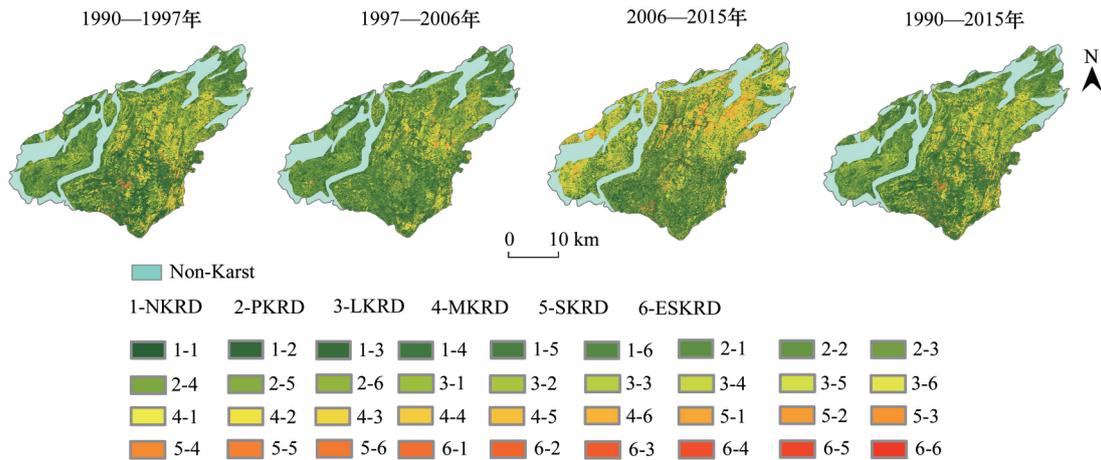


图 12 石漠化转移变化分布图

Fig.12 Change distribution map of karst rocky desertification

图中石漠化类型均为英文缩写 ,KRD: 石漠化 ,Karst rocky desertification; NKRK: 无石漠化 ,No karst rocky desertification; PKRD: 潜在石漠化 , Potential karst rocky desertification; LKRD: 轻度石漠化 ,Light karst rocky desertification; MKRD: 中度石漠化 ,Moderate karst rocky desertification; SKRD: 重度石漠化 ,Severe karst rocky desertification; ESKRD: 极重度石漠化 ,Extremely severe karst rocky desertification

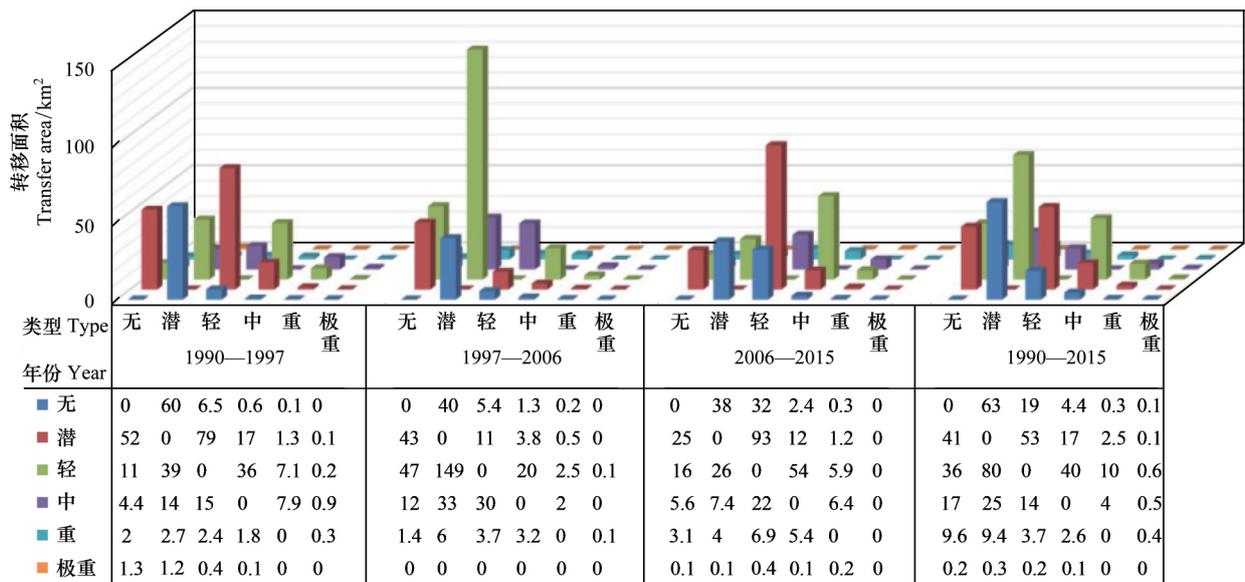


图 13 1990—2015 年石漠化转移矩阵

Fig.13 Karst rocky desertification transfer matrix in 1990—2015

### 3.3.4 石漠化转移变化速率

再次运用栅格计算器计算得到普定县石漠化转移速率变化图(图 15),并统计其转移矩阵如图 16,可以看出重度以上石漠化演变速率极低,几乎等于 0,这也验证了前人的工作基础<sup>[6,22]</sup>。在 1990—1997 年间,轻度-潜在石漠化变化速率最大,为 11.2 km<sup>2</sup>/a; 1997—2006 年间,潜在-轻度石漠化变化速率最大,为 16.5 km<sup>2</sup>/a; 2006—2015 年间,轻度-潜在石漠化变化速率最大,为 10.4 km<sup>2</sup>/a; 1990—2015 年间,潜在-轻度石漠化变化速率最大,为 3.22 km<sup>2</sup>/a。计算各等级石漠化平均变化速率得出(图 17),潜在石漠化恶化的速率最大,为 2.75 km<sup>2</sup>/a,其中,在 1997—2006 年间中速率达到了 16.5 km<sup>2</sup>/a,演变十分迅速。此外,在各年段上,中度以上石漠化整体均在好转,而轻度以下石漠化则反复无常,尤其是潜在石漠化,好转的速率极小,而恶化则十分迅速,因此需要加强对轻度以下石漠化的监察与防护。

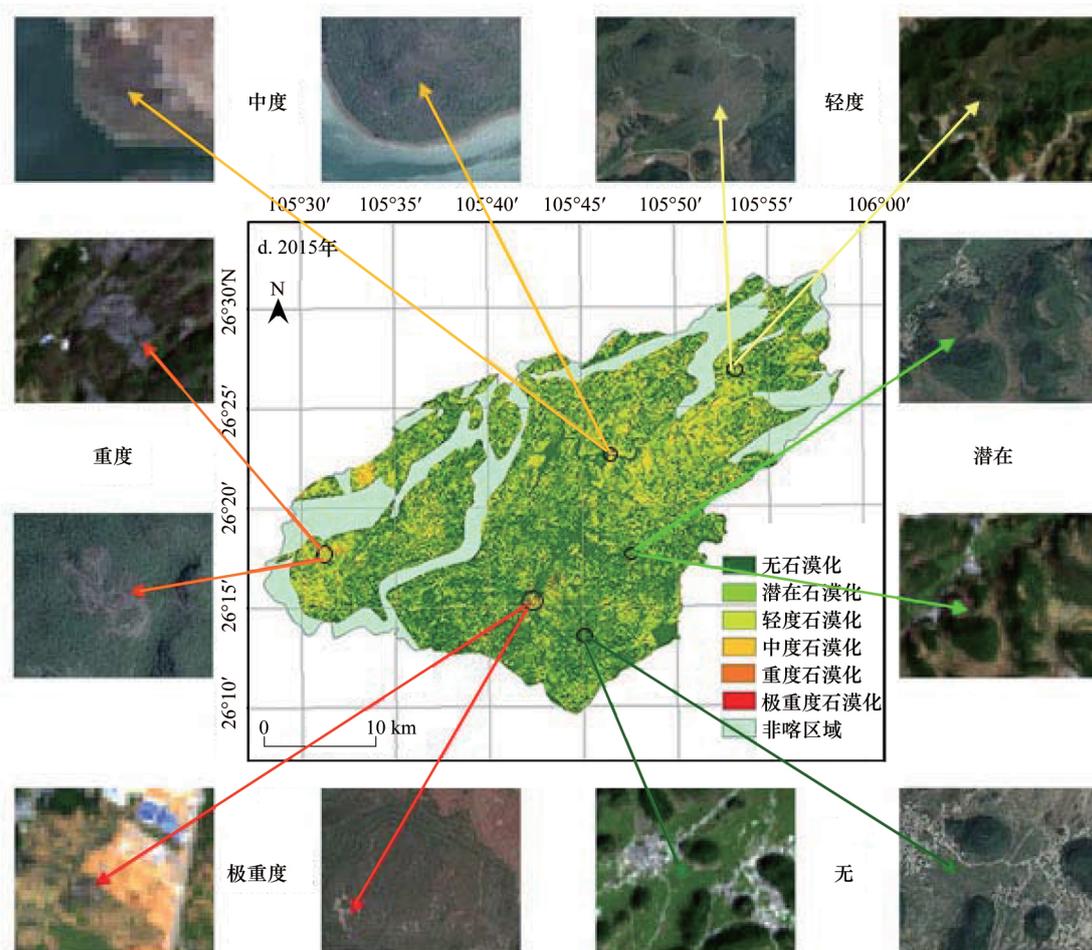


图 14 石漠化解译与实际影像和卫星图对比

Fig.14 Comparison of karst rocky desertification with actual image and satellite map

### 4 讨论

#### 4.1 石漠化时空演变分析

1) 1990 年至 1997 年间,石漠化面积减少了 71.0 km<sup>2</sup>,实际上是在好转,而在 1997 年至 2006 年间,石漠化面积又快速增加了 217.0 km<sup>2</sup>,尤其是潜在向轻度石漠化的转变面积最大,速度最快,这段时间正处于经济发展的黄金期,人类不合理活动强度的增大是导致恶化的主要原因,直到 2005 年后,政府开始实施退耕还林政策,大量石漠化土地被禁止开发,石漠化面积才又开始逐渐减少<sup>[23-24]</sup>,从 2006 年至 2015 年,石漠化面积又减少了 110.0 km<sup>2</sup>。整体来看,从 1990 年到 2015 年,石漠化面积增加了 34.5 km<sup>2</sup>,普定县石漠化经历了由好转到恶化再到好转的演变,总体趋势虽然在好转,但局部地区仍在恶化,石漠化的治理不可掉以轻心。

2) 石漠化转移变化平均速率最快的是潜在石漠化,平均速率为 2.75 km<sup>2</sup>/a,其中在 1997—2006 年间,速率达到了 16.5 km<sup>2</sup>/a;变化速率最慢的是极重度石漠化,平均速率为 0.0002 km<sup>2</sup>/a,这也验证了前人的工作成果,石漠化变化速率与等级高低成反比。此外,好转速率最快的是中度石漠化,平均速率为 0.80 km<sup>2</sup>/a,恶化速率最快的是无石漠化,平均速率为 3.10 km<sup>2</sup>/a,由图 17 看出,轻度以下石漠化变化方向不易确定,而中度以上石漠化则几乎都在好转,因此,在治理中度以上石漠化的同时,更要注重轻度以下尤其是潜在石漠化的防治工作。

3) 结合石漠化因子转移变化图与石漠化空间变化图可以看出,植被覆盖度与岩石裸露率的变化成相反

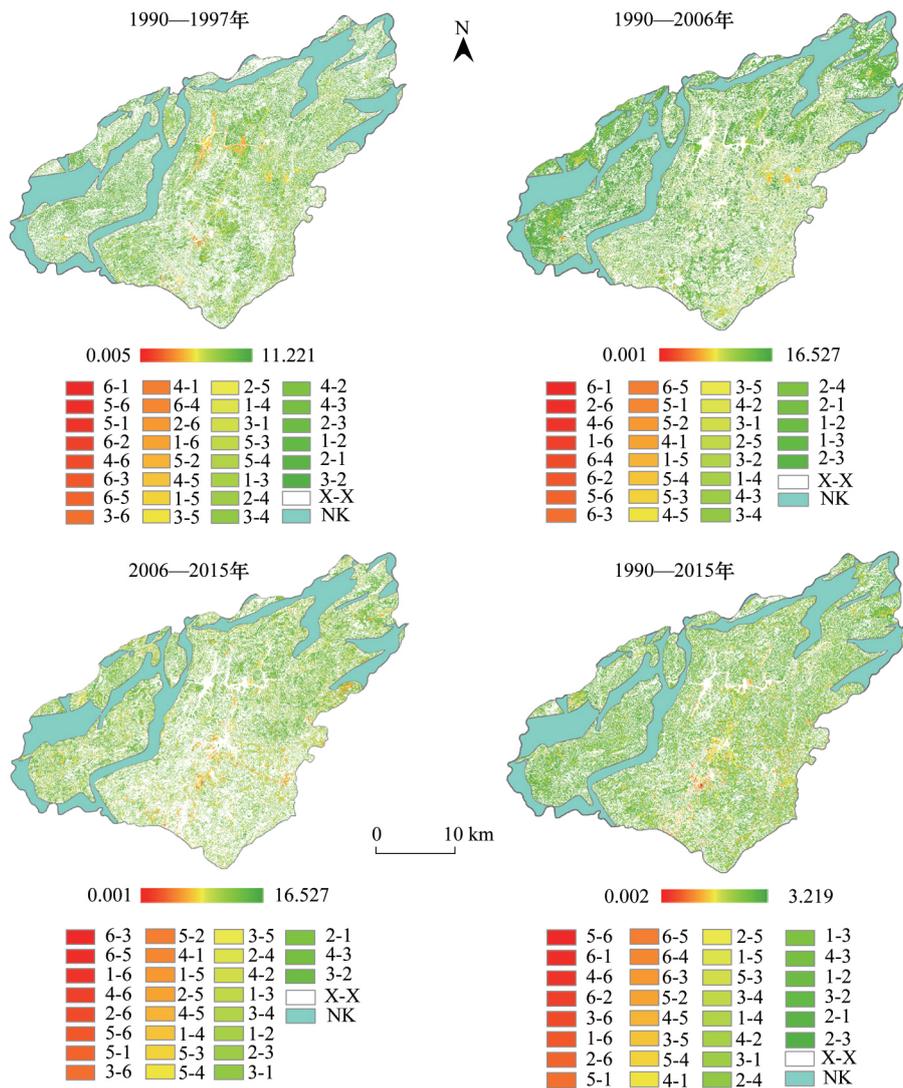


图 15 石漠化转移速率分布图

Fig.15 Velocity distribution map of karst rocky desertification

X—X 为石漠化等级无变化区域,即石漠化演变速率为 0; NK 为非喀斯特地区,非喀斯特地区不涉石漠化问题

关系 在植被覆盖度增加高的区域,石漠化演变多以好转为主,多集中在普定县中部、东南一带;而在岩石裸露率增加高的区域,石漠化演变多以恶化为主,多集中在三岔河一带。

4) 由图 8 分析得出,在石漠化空间分布上,本研究发普定县中度以上石漠化多集中分布在三岔河沿岸附近,而轻度以下石漠化则分布较散乱,无太大规律。

5) 由图 13、图 14 看出,在三岔河附近,常发生着无或潜在石漠化突变为重度石漠化的现象,这往往是由河道拓宽,雨水冲刷,导致无或潜在石漠化地区植被剧减,岩石裸露率暴增导致。此外,在城关镇靠近县城一带,也会出现重度石漠化突变为无石漠化的现象,笔者认为由于此处地势较低,易于土层堆积,人类的开垦荒地等城镇化活动使得重度或极重度石漠化也变为了无或潜在石漠化,从而这也体现了人类活动对石漠化演变的积极一面。

#### 4.2 展望与不足

本文使用的数据由于依赖于遥感影像,因此难免受到卫星过境时间和天气云量等的影响,加之获得的植被覆盖度、岩石裸露率等常受到季节变化的干扰,很难去计算全年的平均值,此为最大的局限性。本文采取的

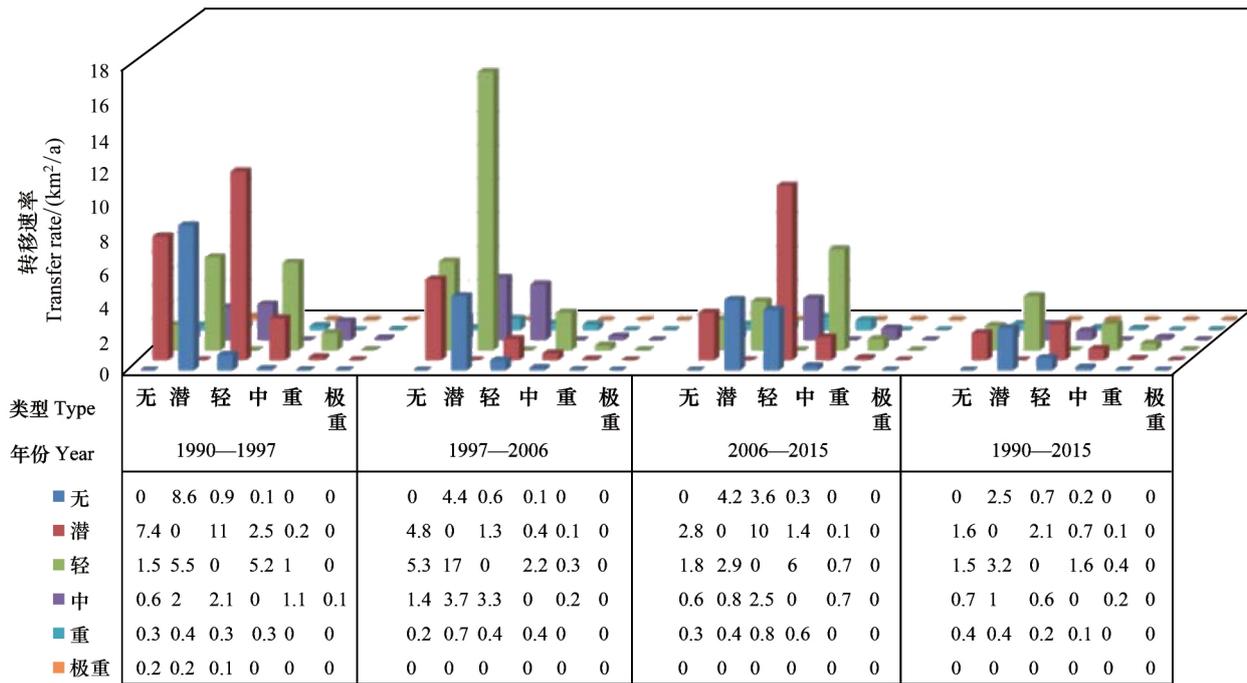


图 16 1990—2015 年石漠化转移速率矩阵

Fig.16 Transfer rate matrix of karst rocky desertification in 1990—2015

方法在总体上反演石漠化精度较高,因子权重较为合理,在喀斯特中小尺度地区内反演石漠化具有一定的优势。

5 结论

本文基于 Landsat、DEM 等数据提取得到的普定县 1990—2015 年 4 期石漠化影像展开分析,重点讨论了普定县的石漠化空间演变规律,主要认识如下: 1) 在 1990—2015 年间,普定县石漠化演变复杂剧烈,经历了由好转到恶化再到好转的阶段,总体演变趋势虽然好转,但局部地区仍旧在恶化,石漠化治理力度需要加大。

2) 普定县中度以上石漠化集中分布在三岔河沿岸附近,轻度以下石漠化则无明显地理分布特征。

3) 潜在和轻度石漠化演变方向复杂,潜在石漠化变化速率最大(2.75 km<sup>2</sup>/a),最大时在 1997—2006 年间达到了 16.5 km<sup>2</sup>/a。

4) 植被覆盖度与岩石裸露率的变化呈负相关,前者主导了石漠化的好转,后者控制了石漠化的恶化。

5) 石漠化演变存在突变,在三岔河沿岸附近,存在无/潜在石漠化有突变为重度石漠化的现象;在靠近城乡居民地附近,也存在重度以上石漠化突变为无石漠化的现象。

参考文献(References):

[1] Yuan D X. Rock desertification in the subtropical Karst of South China. Zeitschrift für Geomorphologie N. F., 1997, 108: 81-90.  
 [2] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨. 中国岩溶, 2002, 21(2): 101-105.  
 [3] 李阳兵, 白晓永, 邱兴春, 周国富, 兰安军, 周绪, 熊康宁. 喀斯特石漠化与土地利用相关性研究. 资源科学, 2006, 28(2): 67-73.  
 [4] 熊康宁, 黎平, 周忠发, 安裕伦, 吕涛, 蓝安军. 喀斯特石漠化的遥感-GIS 典型研究——以贵州省为例. 北京: 地质出版社, 2002.

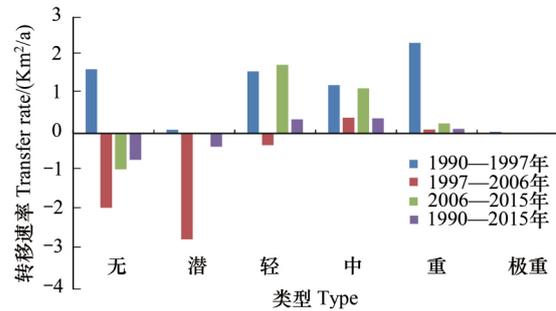


图 17 各级石漠化平均变化速率

Fig.17 Average change rate of karst rocky desertification at all grades

- [5] 胡宝清, 蒋树芳, 廖赤眉, 严志强. 基于 3S 技术的广西喀斯特石漠化驱动机制图谱分析——以广西壮族自治区为例. 山地学报, 2006, 24(2): 234-241.
- [6] 白晓永, 王世杰, 陈起伟, 程安云, 倪雪波. 贵州土地石漠化类型时空演变过程及其评价. 地理学报, 2009, 64(5): 609-618.
- [7] 兰安军, 张百平, 熊康宁, 安裕伦. 黔西南脆弱喀斯特生态环境空间格局分析. 地理研究, 2003, 22(6): 733-741.
- [8] 胡宝清, 金姝兰, 曹少英, 蒋树芳. 基于 GIS 技术的广西喀斯特生态环境脆弱性综合评价. 水土保持学报, 2004, 18(1): 103-107.
- [9] 皇甫江云. 西南岩溶地区草地石漠化动态监测与评价研究——以贵州省晴隆县为例[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [10] 王世杰, 李阳兵. 生态建设中的喀斯特石漠化分级问题. 中国岩溶, 2005, 24(3): 192-195.
- [11] 李瑞玲, 王世杰, 熊康宁, 李凤全. 喀斯特石漠化评价指标体系探讨——以贵州省为例. 热带地理, 2004, 24(2): 145-149.
- [12] 陈飞, 周德全, 白晓永, 肖建勇, 钱庆欢. 典型喀斯特槽谷区石漠化时空演变及未来情景模拟. 农业资源与环境学报, 2018, 35(2): 174-180.
- [13] 张晓伦, 甘淑. 基于 NDRI 像元二分模型的石漠化信息提取研究. 新技术新工艺, 2014, (1): 72-75.
- [14] Huang Q H, Cai Y L. Mapping karst rock in Southwest China. Mountain Research and Development, 2009, 29(1): 14-20.
- [15] 李丽, 童立强, 李小慧. 基于植被覆盖度的石漠化遥感信息提取方法研究. 国土资源遥感, 2010, 22(2): 59-62.
- [16] 马华, 王云琦, 王力, 王益坤. 近 20a 广西石漠化区植被覆盖度与气候变化和农村经济发展的耦合关系. 山地学报, 2014, 32(1): 38-45.
- [17] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [18] 周忠发. 遥感和 GIS 技术在贵州喀斯特地区土地石漠化研究中的应用. 水土保持通报, 2001, 21(3): 52-54.
- [19] 梅再美, 王代懿, 熊康宁, 兰安军, 陈永毕, 孙建昌, 余金勇. 不同强度等级石漠化土地植被恢复技术初步研究——以贵州花江试验示范区查尔岩试验小区为例. 中国岩溶, 2004, 23(3): 253-258.
- [20] 王金华, 李森, 李辉霞, 罗红波, 王明刚. 石漠化土地分级指征及其遥感影像特征分析——以粤北岩溶山区为例. 中国沙漠, 2007, 27(5): 765-770.
- [21] 张文源, 王百田. 贵州喀斯特石漠化分类分级探讨. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2015, 39(2): 148-154.
- [22] 左太安, 刁承泰, 苏维词, 孙秀锋, 官冬杰. 毕节试验区石漠化时空演变过程和演变特征. 生态学报, 2014, 34(23): 7067-7077.
- [23] 张信宝, 王世杰, 白晓永, 陈伟燕, 张思屿. 贵州石漠化空间分布与喀斯特地貌、岩性、降水和人口密度的关系. 地球与环境, 2013, 41(1): 1-6.
- [24] 白晓永, 熊康宁, 李阳兵, 兰安军. 喀斯特山区不同强度石漠化与人口因素空间差异性的定量研究. 山地学报, 2006, 24(2): 242-248.