doi: 10.6046/gtzyyg.2019.04.30

引用格式: 吴林霖,官云兰,李嘉伟,等. 基于 MODIS 影像喀斯特石漠化状况研究——以贵州省为例[J]. 国土资源遥感,2019, 31(4):235-242. (Wu L L, Guan Y L, Li J W, et al. Assessment of Karst rocky desertification based on MODIS: Exemplified by Guizhou Province[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2019, 31(4):235-242.)

基于 MODIS 影像喀斯特石漠化状况研究

吴林霖^{1,2},官云兰^{1,2},李嘉伟³,袁晨鑫¹,李 睿¹

(1.东华理工大学测绘工程学院,南昌 330013; 2.流域生态与地理环境监测国家测绘地理信息局重点实验室,南昌 330013; 3.广东南方数码科技股份有限公司,广州 510665)

摘要:石漠化在喀斯特地貌发达的区域广泛存在,快速获取大范围的石漠化现状,监测石漠化的变化具有重大意义。以喀斯特地貌发育最广的贵州省为研究区域,基于 2007 年、2010 年、2016 年 3 个时期的 MODIS 影像估算植被覆盖度和基岩裸露度,加入坡度和人口密度共同作为评价因子,比较各个因子对石漠化的贡献量,建立判断矩阵,采用层次分析法计算各因子的权值并进行一致性检验。根据所计算的权值建立石漠化评价模型划分石漠化程度,提取贵州省近 10 a 间的石漠化信息,获得了研究区石漠化概况及转移特征,分析了石漠化的时空演化和动态变化。研究结果表明:①研究区石漠化在近 10 a 间有了显著改善,2010—2016 年间石漠化治理效果尤为突出,由 2010 年轻度石漠化与中度石漠化各占总面积的 55.67% 和 40.53%,到 2016 年轻度石漠化与中度石漠化 各占总面积的 79.71% 和 17.35%;②在石漠化等级转化过程中,中度石漠化为重度石漠化与轻度石漠化相互转化的过渡期,从石漠化治理角度可以先由重度石漠化改善为中度石漠化,再由中度石漠化改善为轻度石漠化;

关键词:喀斯特石漠化;石漠化评价模型;贵州石漠化;MODIS

中图法分类号: TP 79 文献标志码: A 文章编号: 1001-070X(2019)04-0235-08

0 引言

喀斯特地貌在我国又称为岩溶地貌,一般指碳酸盐岩分布地区或存在流经石灰岩的地下水所形成的特有地貌现象^[1]。贵州省是我国喀斯特地貌分布最广的省份,比"喀斯特"名称起源地的前南斯拉夫的喀斯特地貌分布面积占比还大,其石漠化问题也最为突出^[2]。由袁道先院士首先提出了石漠化的概念,即含有植被、土地覆盖的喀斯特地区经各类因素使得岩石裸露的过程,并指出了石漠化是中国南方亚热带喀斯特地区严峻的生态问题^[3]。我国对石漠化重视较早,取得了一定的治理进展,研究方法也由最初的人工调查转变为基于 3S 集成技术的石漠化时空演化与动态变化分析,以及石漠化信息提取和目标识别。李水明等^[4]基于 K2 结构学习算

法结合样本分类信息获取石漠化特征子集,并以此 提取石漠化信息;蓝安军等^[5]分析了植被覆盖率与 石漠化的负相关关系并引入石漠化动力指数来表征 石漠化的分级和现状;李松等^[6]基于 1992 年、2001 年 2 个时期的 TM/ETM +影像,在进行数据预处理 后采用图像差值法对石漠化进行了变化检测,并提 取了变化信息。当前对喀斯特石漠化的研究主要集 中在石漠化分布状况、动态监测、预警分析、演化机 制和生态治理等方面^[7],但大多是在小区域尺度范 围内进行的,仅依据遥感提取的石漠化信息做单因 素的石漠化特征反演,获得的成果有一定的局限性; 并且由于选取的指标各不相同,研究结果难以进行 相互间的分析、比较。

为此,本文利用 MODIS 影像大空间尺度的特点, 综合考虑人地因素对石漠化的影响,引入4 类石漠化 评价因子(植被覆盖度(vegetation fractional cover,

收稿日期: 2018-10-26;修订日期: 2019-02-26

<sup>基金项目:国家自然科学基金项目"基于特征的大场景地面 LiDAR 点云配准"(编号:41401437)、江西省学位与研究生教育教学改革研究项目"基于 PBL 教学模式的《遥感数字图像处理》课程教学改革与实践"(编号:JXYJG-2016-113)和江西省教育厅教改项目"基于 PBL 教学模式的《遥感原理与应用》课程教学改革与实践"(编号:JXJG-17-6-9)共同资助。
第一作者:吴林霖(1996-),女,硕士研究生,主要从事资源环境遥感、气候变化及其区域响应等研究。Email:wull_500@126.com。
通信</sup>**伊者方数程**(1975-),女,博士,教授,主要从事摄影测量、遥感图像处理和三维激光扫描等研究。Email: guan8098@163.com。

VFC)、基岩裸露度、坡度和人口密度(population density,PD))建立石漠化评价模型,研究贵州省近10 a 间的石漠化分布状况,提取石漠化信息并对石漠化进 行变化检测,进而分析石漠化变化特征与时空演化趋 势。快速、高效地了解大范围的石漠化现状,监测石 漠化变化情况是提供石漠化治理方向和改善生态环 境的基础,在石漠化研究中具有重大的意义。

1 研究区及数据源

1.1 研究区概况

贵州省地处长江和珠江两大水系的分水岭地 区,云贵高原东部,气候温暖湿润,属亚热带湿润季 风气候^[8]。全省总面积为176167km²,地势西部最 高,中部稍低,并分别向北部四川盆地、东部湖南低 山丘陵和南部广西盆地逐步过渡,东西呈三级阶梯, 南北有两大斜坡,平均海拔为1100m,最大高差达 2763m,形成了一个总体地势较高,内部分异较大, 深受河流切割的亚热带喀斯特高原山区^[9]。贵州 省是一个碳酸盐岩广泛分布、喀斯特强烈发育的区 域,碳酸盐岩总厚度约17000m,占全省沉积岩总厚 度的70%以上,其中纯碳酸盐岩厚度约为碳酸盐岩 总厚度的62%^[10-11]。

1.2 数据源

本文使用的数据包括遥感影像、数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据、人口数据及地 理矢量数据等。遥感影像采用 EOS 系列卫星上搭 载的 MODIS 中分辨率成像光谱仪传感器获取的陆 地标准产品 MOD09A1 500M 地表反射率8 d 合成产 品,提供了 1—7 波段的 500 m 空间分辨率影像数 据,参数如表1 所示。选取 2007 年、2010 年和 2016 年获取时间相近的3 期影像进行后续处理。

表 1 MODIS 500 m 地表反射率 8 d 合成产品参数 Tab. 1 MODIS 500 m surface reflectance

8 – days composition product

参数	参数数值
覆盖范围(经度×纬度)/(°)	约 10 × 10
文件大小/MB	约 64
投影	正弦曲线投影
数据格式	HDF – EOS
维数(行×列)	24 00 × 2 400
空间分辨率/m	500
时间范围	2007年、2010年和2016年

DEM 数据为 SRTM (shuttle Radar topography mission)90 m 空间分辨率原始高程数据,由美国国家航空航天局和国防部国家图像测绘局联合测量。 DEM 数据了京教播IS 数据均来源于中国科学院计算 机网络信息中心地理空间数据云平台(http:// www.gscloud.cn)。人口数据来源于贵州省统计局 《贵州省统计年鉴》获取的 2007 年、2010 年和 2016 年各市(州)年末常住人口。地理矢量数据来源于 国家基础地理数据库,包括省界和市界。

2 评价因子

目前并没有确定的石漠化评价体系,而遥感石 漠化监测需要考虑遥感技术的特点和石漠化评价的 应用需求^[12]。基岩裸露度和 VFC 是石漠化最直观 的地面表现特征,故为石漠化评价的关键指标^[13]。 坡度会影响土壤侵蚀,是诱发石漠化的原因之 一^[14]。石漠化是自然因素和人为因素共同作用的 结果,人类活动对自然环境有着不可磨灭的影响,人 口剧增给土地带来的压力以及不合理的人类活动, 会加速石漠化的进程^[15]。因此,本文选取 VFC、基 岩裸露度、坡度和 PD 作为评价因子,根据层次分析 法(analytic hierarchy process,AHP)建立石漠化评价 模型,提取石漠化信息。

2.1 VFC

VFC 是指植被(包括叶、茎、枝)在地面的垂直 投影面积占统计区总面积的百分比^[16]。岳跃民 等^[17]已验证植被指数对于提取石漠化信息的有效 性,故本文选用归一化差值植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)估算 VFC,并以李 苗苗^[18]在像元二分法基础上研究的 VFC 提取方法 建立模型。由于岩溶地区土被分布浅薄且不连续, 在提取 VFC 时可以暂不考虑土壤的影响^[19]。本文 假设研究区可近似取 VFC_{max} = 100%, VFC_{min} = 0,则 VFC 的计算公式为

$$VFC = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} , \qquad (1)$$

式中 NDVI_{max} 和 NDVI_{min} 分别表示研究区 NDVI 最 大和最小值。由于噪声的影响, NDVI_{max}和 NDVI_{min} 一般会取一定置信度范围内的最大和最小值。根 据置信区间 5%~95%, 使用 ENVI 软件查看不同 时期 NDVI 直方图, 获取不同时期 NDVI 最大和最 小值如表 2 所示。

表 2 NDVI 最大和最小值 Tab. 2 Maximum and minimum of NDVI

年份	NDVI _{max}	NDVI _{min}
2007 年	0.639	0.318
2010 年	0.710	0.310
2016 年	0.821	0.468

将表中的 NDVI_{max} 和 NDVI_{min} 代入式(1),可估

算出研究区 2007 年、2010 年和 2016 年的 VFC。

2.2 基岩裸露度

基岩裸露度采用 Rikimaru^[20]提出的裸土指数 (bare soil index,BSI)估算。由于裸土的光谱特征在 中红外波段反射率最高,BSI 通过高反射率波段减 去低反射率波段从而突出裸土信息,并且加入了蓝 光波段进行归一化,计算结果中裸土的亮度(DN 值)最高,其次为建筑用地,易于区分出裸土、植被 与水体。BSI 公式为

$$BSI = \frac{(r_6 - r_1) - (r_2 - r_3)}{(r_6 + r_1) + (r_2 + r_3)} , \qquad (2)$$

式中 r₁, r₂, r₃ 和 r₆ 分别为 MODIS 数据红光、近红 外、蓝光和短波红外波段的反射率值。

2.3 坡度

坡度是地面陡缓的程度,是衡量石漠化的重要因子^[14]。采用地理空间数据云平台 DEM 数据切割 模型对 DEM 裁剪,再使用 ENVI 软件对 DEM 拼接, 最后生成坡度图。坡度计算公式为

Slope = arctan
$$\sqrt{f_x^2 + f_y^2} \frac{180^\circ}{\pi}$$
, (3)

式中: *Slope* 为坡度; f_x 和 f_y 分别为水平方向和垂直 方向高程变化率。

2.4 PD

PD 是指单位面积土地上居住的人口数^[15]。本研究的人口信息从贵州省统计年鉴获得(2007年、2010年、2016年各市(州)年末常住人口),通过ArcGIS软件将信息添加入县市级矢量数据属性表

中,再经由核密度分析计算研究区各市级单位的人口分布情况,获取研究区的 PD。

2.5 评价因子归一化

不同的评价因子数值大小不在同一量级,量纲 不统一,直接对石漠化程度进行评价较为困难。因 此,需要对各评价因子进行归一化,使其具有相同的 量纲进而参与石漠化评价模型计算。将编码值设为 1—10,统一各评价因子的量值,以数值大小表示对 石漠化的影响程度,影响越大,编码值越大;影响越 小,编码值则越小。坡度、基岩裸露度和 PD 对石漠 化起正向影响,数值从低到高分为 1—10 的等级。 VFC 值越高表示植被越茂密,对石漠化起反向影 响; VFC 值越高,石漠化程度越小,反之则越大。因 此,将 VFC 值从高到低分为 1—10 的等级。

3 石漠化评价模型建立

石漠化评价模型是基于各类归一化评价因子, 通过比较评价因子重要性来综合计算各评价因子权 重而建立的,以 Saaty^[21]提出的 AHP 来确定评价因 子权值。该方法是一种定性和定量相结合的目标决 策分析方法。首先,根据相对重要性的比例标度评 判各因子的重要性建立判断矩阵,比例标度如表 3 所示;其次,经过一系列计算逐步剔除主观元素,使 计算的权值尽可能客观公正;最后,所求出的权值还 需要对其进行一致性检验,计算出一致性检验系数 *CR*,当*CR* < 0.1 时,判断矩阵通过一致性检验,否则 不满足一致性。

表 3 比例标度 Tab. 3 Proportion criteria

甲指标比乙指标	极重要	很重要	重要	略重要	同等	略次要	次要	很次要	极次要
甲指标评价值	9 ^①	7	5	3	1	1/3	1/5	1/7	1/9

①8,6,4,2,1/2,1/4,1/6,1/8为以上重要性标度的中间值。

具体计算步骤如下:

1)根据表 3 所示的比例标度结合研究区实际 情况将评价因子两两进行比较确定相对重要性数值 来建立判断矩阵 *A*,如表 4 所示。

表4 判断矩阵及权值

Tab. 4 Judgment matrix and weight

评价因子	VFC	BSI	坡度	PD	权值
VFC	1	3	5	6	0.55
BSI	1/3	1	3	6	0.28
坡度	1/5	1/3	1	3	0.12
PD	1/6	1/6	1/3	1	0.05

2) 计算判断矩阵各行的乘积, 即

万戎数据
$$\prod_{j=1}^{n} a_{ij}, i = 1, 2, \cdots, n$$
 , (4)

式中: *i* 和 *j* 分别为判断矩阵的行和列号; *n* 取值为 4,因为选择了 4 个评价因子建立模型。

3) 计算 M_i 的 n 次方根, 即

$$\overline{W}_i = \sqrt[n]{M_i} \quad 0 \tag{5}$$

4)设 $\boldsymbol{\alpha} = (\overline{W}_1, \overline{W}_2, \cdots, \overline{W}_i)^{\mathrm{T}}$,对向量 $\boldsymbol{\alpha}$ 进行归 一化,即

$$w_i = \overline{W}_i / \sum_{i=1}^n \overline{W}_i \quad , \tag{6}$$

式中 w_i 为第i行对应的评价指标权值。

5)将上述结果代入公式(7)求出最大特征根,即

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{(Aw)_i}{w_i} , \qquad (7)$$

式中 (*Aw*)_{*i*} 为矩阵 *A* 第*i* 行所有元素与向量 *w* 第*i* 行对应权值的乘积。

6) 计算一致性系数 CR, 检验一致性。其表达 式为

$$CR = \frac{CI}{RI}$$
, (8)

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} , \qquad (9)$$

式中 *RI* 通过查表可得,当 *n* = 4 时,*RI* = 0.89。当 *CR* < 0.1 时,通过一致性检验,否则修改判断矩阵比 例标度,直到通过一致性检验。根据上述步骤计算 出 *CR* = 0.060 726 704,通过一致性检验,说明判断 矩阵比例标度合理,权值可行。根据计算的权值建 立石漠化评价模型 *D*,即

$$D = w_1 VFC + w_2 BSI + w_3 Slope + w_4 PD , \quad (10)$$

式中: $w_1 = 0.55$,为 VFC 所对应的权值; $w_2 = 0.28$, 为 BSI 所对应的权值; $w_3 = 0.12$,为坡度所对应的 权值; $w_4 = 0.05$,为 PD 所对应的权值。

4 石漠化状况分析与评价

4.1 石漠化分级标准

对石漠化程度分级,基于不同的影像数据和评

价因子有不同的分级标准。刘芳等^[22]在 Landsat8 热红外影像基础上,确定不同石漠化程度的亮温差, 并依据亮温差建立了评价标准;李丽等^[23]基于 ND-VI 估算 VFC,并依据研究区的 VFC 建立了石漠化 评价标准。本文沿用现行的分级方法^[24],将石漠化 程度划分为4个等级,即无石漠化、轻度石漠化、中 度石漠化和重度石漠化。根据归一化编码值(1— 10)分为4类,如表5 所示。

表 5 石漠化分级标准

Tab. 5 Hierarchy standard of rocky desertification extent

石漠化评 价等级	综合评 价指数	石漠化程度分析
无石漠化	[1,3)	植被生态环境良好,结构合理,坡度平缓, 无明显水土流失和喀斯特石漠化现象
轻度 石漠化	[3,5)	植被生态环境未受到破坏,结构较合理,披 度平缓,有些许水土流失和喀斯特石漠化 现象
中度 石漠化	[5,7)	植被生态环境受到破坏,结构较不合理,披 度较陡峭,存在水土流失和喀斯特石漠化 现象
重度 石漠化	[7,10]	植被生态环境受到严重破坏,结构不合理, 坡度陡峭,有严重水土流失和喀斯特石漠 化现象

4.2 3个时期石漠化状况分析

根据上述方法及分级标准,得到 2007 年、2010 年及 2016 年 3 期贵州省不同等级的石漠化空间分 布状况,如图 1 所示。



Fig. 1 Classification of rocky desertification extent

1)2007年石漠化分布。2007年全省大部分区 域为轻度石漠化,其次为中度石漠化。轻度石漠化 占全省总面积的50.80%;中度石漠化与重度石漠 化占全省总面积的比例分别为42.16%和6.99%, 其中凯里市和遵义市南部存在较少的石漠化现象, 中度石漠化主要分布在遵义市东北部、毕节市和六 盘水市,兴义市、贵阳市也有少量分布;重度石漠化 主要分布在毕节市,少数分布于安顺市与六盘水市 的交界区、遵义市和贵阳市。

2)2010年石漠化分布。相较于2007年而言, 全省范围的重要石漠化区域有所减少,约占全省 总面积的 3.69%;中度石漠化约占全省面积的 40.53%;而轻度石漠化则占全省面积 55.67%。 其中毕节市依旧表现为大面积的中度石漠化,重 度石漠化相较 2007 年有部分减少;六盘水市和兴 义市西部中度、重度石漠化分布范围增加;都匀市 与遵义市主要为中度石漠化和极小片的重度石漠化; 安顺市与凯里市基本为轻度石漠化和无石漠化。

3)2016年石漠化分布。2016年的石漠化情况明显改善了许多,轻度石漠化占全省面积的79.71%,中度石漠化和重度石漠化分别减少到了17.35%和2.87%。其中毕节市由重度石漠化大范围分布转变

为轻度石漠化,使轻度石漠化所占比重明显增加,重 度石漠化仍主要分布在西部地区;遵义市、铜仁市和 都匀市的石漠化情况较为相似,有少许中度石漠化, 而大范围分布轻度石漠化;贵阳市重度石漠化分布 没有明显变化,说明贵阳市重度石漠化程度较稳定; 兴义市西北部中度石漠化分布较多;凯里市主要为 轻度石漠化,中度石漠化有零散分布。

4.3 石漠化总体变化

通过图像差值法,将对应像元的灰度值相减, 获取不同时相的差异以达到对2景不同时期影像 进行石漠化变化检测的目的。对2007年、2010年 和2016年3个时期的石漠化评价结果两两进行差 值,将差值图像阈值设为:-1为石漠化减少、1为 石漠化增加,结果如图2所示。





由图 2(a)可以看出,2007—2010年间,石漠化 减少区域明显大于石漠化增加区域。在贵州省西部 (六盘水市、兴义市),中部(贵阳市、都匀市)和东北 部(遵义市、铜仁市)等有少量石漠化增加现象,而 贵州西北部(毕节市)石漠化明显减少。如图 2(b) 所示,2010—2016年间,石漠化趋势主要表现为减 少,大部分减少区域位于贵州省西北部(毕节市、六 盘水市),东北部(遵义市、铜仁市),中部、西南部有 少许减少趋势;增加区域主要在贵州省西南部(兴 义市、安顺市和六盘水市),与2007—2010年相比, 呈现持续增加趋势。

4.4 石漠化分级变化

通过比较分级区域的变化,可以检测出轻度石 漠化、中度石漠化和重度石漠化相互间的转移变化 情况,2007—2010 年和 2010—2016 年期间石漠化 转移情况如图 3 所示。





由图 3 可以看出,在 2007—2010 年间,轻度石 漠化总体增加趋势最明显,由中度和重度石漠化转 移为轻度石漠化的比例分别为 8.15% 和 0.25%,但 仍有 6.14% 的轻度石漠化转化为中度石漠化;重度 石漠化转为中度石漠化的比例仅有 2.29%,表明这 期间对石漠化的治理有一定成效,但还是存在石漠 化程度加**重**存满祝。在 2010—2016 年期间,石漠化 现象得到明显改善,其中中度石漠化向轻度石漠化的转移比例为 14.61%,转换为重度石漠化的比例 (仅为 0.58%;轻度石漠化转化为中度石漠化的比例 也只有 2.59%。

对比 2 个阶段的石漠化转移情况,发现轻度转向中度石漠化的比例远远大于轻度转为重度石漠化的比例,重度石漠化转为中度石漠化的比例大于转

为轻度石漠化的比例。该现象说明中度石漠化为重 度石漠化与轻度石漠化相互转化的中间过程,从石 漠化治理角度可以先由重度石漠化改善为中度石漠 化,再由中度石漠化改善为轻度石漠化;中度石漠 化与轻度石漠化相互之间的转化占比较大,说明这 2种石漠化类型具有跳跃性;重度石漠化转移面积 比较少,说明重度石漠化具有稳定性,难以改善。这 与白晓永等^[9]、赵丽苹^[25]发现石漠化转移及演替的 特征基本一致。

5 讨论

在熊康宁等[26]的研究中先将研究区划分为喀 斯特区与非喀斯特区。本文考虑到贵州省碳酸盐岩 几乎分布全境,石漠化区域也比较大,所以提取石漠 化信息时没有先剔除非喀斯特区,而是将整个研究 区作为喀斯特区域。由于选择的研究区范围较大. 选择 MODIS 中分辨率成像光谱仪产品较为适合,并 且选用 MODIS 地表反射率 8 d 合成产品,避免复杂 的数据预处理过程。但由于 MODIS 影像的空间分 辨率较低,不可避免的存在混合像元,加之研究区域 范围较大,且没有实地考察来验证本文研究的提取 精度。因此,模型计算结果只能宏观表示研究区石 漠化概况与变化趋势。评价因子计算中,李霞等[27] 曾基于 SPOT 影像,采用归一化土壤指数(normalized difference soil index, NDSI)和不透水面指数 (normalized difference impervious surface index, NDI-SI) 双指数法确定一定经验阈值区分裸土与建筑用 地。但是, MODIS 影像尚不具备区分建筑用地与裸 土的空间分辨率,故本文只采用 BSI 单一指数估算 了基岩裸露度。在今后的研究中可以尝试结合其他 方法提高估算精度。

6 结论

基于 MODIS 地表反射率 8 d 合成产品,选取植 被覆盖度、基岩裸露度、坡度和人口密度作为评价因 子,采用层次分析法计算各因子权值,通过一致性检 验后建立石漠化评价模型,确定分级标准划分石漠 化程度,得到了不同时期的石漠化评价结果;对 2007 年、2010 年和 2016 年 3 个时期的石漠化评价 结果两两进行变化检测,获得石漠化的总体变化以 及石漠化分级变化状况;完成了对贵州省石漠化状 况的评价,并分析了石漠化变化趋势及时空演化特 征。取得的主要结论如下:

1)研究医结膜化在近 10 a 间已得到了较大的

改善,2010—2016 年期间石漠化治理效果尤为突出。由 2010 年轻度石漠化与中度石漠化分别占全省总面积的 55.67% 和 40.53%,到 2016 年轻度石 漠化与中度石漠化分别占全省总面积的 79.71% 和 17.35%,中度石漠化同比减少了 23.18%,轻度石 漠化增加了 24.04%。重度石漠化有明显的改善,从 2007 年占全省总面积的 6.99% 降到了 2016 年的 2.87%。

2)在石漠化等级转化过程中,中度石漠化与轻 度石漠化相互之间的转化率较高,说明这2种石漠 化类型具有跳跃性;中度石漠化为重度石漠化与轻 度石漠化相互转化的中间过程,从石漠化治理角度 可以先由重度石漠化改善为中度石漠化,再由中度 石漠化改善为轻度石漠化。

3) 对比 2007—2010 年和 2010—2016 年期间的 石漠化转移矩阵,重度石漠化转移面积最小,表明重 度石漠化较为稳定,改善难度较大。2007—2010 年 间由重度石漠化转化为中度石漠化和轻度石漠化所 占比例分别为 0. 25% 和 2. 29%,2010—2016 年间 由重度石漠化转化为中度石漠化和轻度石漠化所占 比例分别为 0. 59% 和 0. 45%。

参考文献(References):

[1] 高贵龙,邓自民,熊康宁,等.喀斯特的呼唤与希望——贵州喀 斯特生态环境建设与可持续发展[M].贵阳:贵州科技出版 社,2003.

Gao G L, Deng Z M, Xiong K N, et al. The Call and Hope of Karst: Construction and Sustainable Development of Karst Ecological Environment in Guizhou Province [M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Publishing House Co., Ltd., 2003.

- [2] 袁春,周常萍,童立强,等.贵州土地石漠化的形成原因及其 治理对策[J].现代地质,2003,17(2):181-185.
 Yuan C,Zhou C P,Tong L Q, et al. The causes and tackle countermeasures of land rocky desertification in Guizhou Province[J]. Geoscience,2003,17(2):181-185.
- [3] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨[J]. 中国岩溶,2002,21(2):101-105.
 Wang S J. Concept deduction and its connotation of Karst rocky desertification[J]. Carsologica Sinica,2002,21(2):101-105.
- [4] 李水明,舒 宁,陶建斌,等.一种基于 K2 结构学习算法的石漠
 化数据特征选择方法[J].桂林理工大学学报,2009,29(4):
 548-554.

Li S M, Shu N, Tao J B, et al. Rock desertification data feature selection method based on K2 structure learning algorithm[J]. Journal of Guilin University of Technology,2009,29(4):548-554.

[5] 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):19-23.
Lan A J,Xiong K N, An Y L. Analysis on driving factors of Karst rock - desertification with a special reference to Guizhou Province
[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001,21(6):1923.

[6] 李 松,安裕伦,华厚强.基于遥感变化检测的石漠化信息自动 提取[J].遥感技术与应用,2012,27(1):149-153.

Li S, An Y L, Hua H Q. Automated method based on change detection for extracting Karst rock desertification information using remote sensing [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012,27(1):149-153.

[7] 王 昆.典型喀斯特地区石漠化演变关键因子阈值研究与预警 分析[D].贵阳:贵州师范大学,2016.

Wang K. Research on the Threshold of the Key Factors for the Evolution of Rocky Desertification in Typical Karst Area and Early Warning Analysis [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2016.

[8] 刘京伟,王华书.贵州喀斯特地区生态环境建设与农村经济发展研究[J].贵州农业科学,2010,38(6):227-231.

Liu J W, Wang H S. Ecological environmental construction and rural economic development in Karst mountainous areas of Guizhou Province[J]. Guizhou Agriculture Sciences, 2010, 38(6):227 – 231.

- [9] 白晓永,王世杰,陈起伟,等.贵州土地石漠化类型时空演变过 程及其评价[J].地理学报,2009,64(5):609-618.
 Bai X Y,Wang S J,Chen Q W, et al. Spatio - temporal evolution process and its evaluation method of Karst rocky desertification in Guizhou Province[J]. Acta Geographica Sinca,2009,64(5):609-618.
- [10] 李阳兵,王世杰,李瑞玲,等.关于西南岩溶山区生态建设的一些讨论——以贵州省为例[J].中国岩溶,2004,23(1):20 24.

Li Y B, Wang S J, Li R L, et al. Discussion on the construction to Karst mountain ecology in southwest China: A case in Guizhou Province[J]. Carsologica Sinca, 2004, 23(1):20-24.

[11] 胡 锋.亚喀斯特地区景观特征与生态环境效应探讨研究—— 以贵州为例[D].贵阳:贵州师范大学,2016.

Hu F. Study on the Landscape Features and Ecological Environment Effect of Semi – Karst Region: A Case Study of Guizhou Province[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2016.

- [12] 李瑞玲,王世杰,熊康宁,等. 喀斯特石漠化评价指标体系探 讨——以贵州省为例[J]. 热带地理,2004,24(2):145-149.
 Li R L, Wang S J, Xiong K N, et al. A study on rocky desertification index system: A case of Guizhou Province[J]. Tropical Geography,2004,24(2):145-149.
- [13] 黄 岩,谢世友,赵亚萍.基于 ETM 影像的喀斯特石漠化调查研究——以重庆南川市为例[J].国土资源遥感,2008,20(1): 55-58.doi;10.6046/gtzyyg.2008.01.12.

Huang Y, Xie S Y, Zhao Y P. Karst desertification investigation based on ETM image: A case study of Nanchuan City[J]. Remote Sensing for Land and Resourses, 2008, 20(1):55 - 58. doi:10. 6046/gtzyg. 2008.01.12.

[14] 马志勇,沈 涛,张军海,等. 基于植被覆盖度的植被变化分析 [J]. 测绘通报,2007(3):45-48.

Ma Z Y, Shen T, Zhang J H, et al. Vegetation changes analysis based on vegetation coverage [J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2007(3):45-48.

[15] 党宇宁,南亲江,吴虹.坡度因子对喀斯特石漠化的影响[J]. 地质学刊,2016,40(4):674-677. Dang Y N, Nan Q J, Wu H. Effects of slope factors on Karst rocky desertification [J]. Journal of Geology, 2016, 40(4):674-677.

- [16] 张佳华,张国平,王培娟. 植被与生态遥感[M]. 北京:科学出版社,2010.
 Zhang J H, Zhang G P, Wang P J. Vegetation and Ecological Remote Sensing[M]. Beijing; Science Press, 2010.
- [17] 岳跃民,王克林,张 兵,等. 喀斯特石漠化信息遥感提取的不确定性[J]. 地球科学进展,2011,26(3):266-274.
 Yue Y M, Wang K L, Zhang B, et al. Uncertainty of remotely sensing extraction of information of Karst rocky desertification[J]. Advances in Earth Science,2011,26(3):266-274.
- [18] 李苗苗. 植被覆盖度的遥感估算方法研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(遥感应用研究所),2003.
 Li M M. The Method of Vegetation Fraction Estimating by Remote Sensing[D]. Beijing; Chinese academy of science(IRSA),2003.
- [19] 岳跃民,张 兵,王克林,等.石漠化遥感评价因子提取研究
 [J].遥感学报,2011,15(4):722-736.
 Yue Y M,Zhang B, Wang K L, et al. Remote sensing of indicators for evaluating Karst rocky desertification [J]. Journal of Remote Sensing,2011,15(4):722-736.
- [20] Rikimaru A. Landsat TM data processing guide for forest canopy density mapping and monitoring model [C]//ITTO workshop on utilization of remote sensing in site assessment and planning for rehabilitation of logged – over forest, Bangkok, Thailand, 1996, 8:1 – 8.
- [21] Saaty T L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation [M]. New York: Mc Graw – Hill, 1980.
- [22] 刘 芳,何报寅,张 亮,等. 基于热红外遥感的广西平果县石漠 化初步研究[J]. 长江流域资源与环境,2016,25(6):952 -956.

Liu F, He B Y, Zhang L, et al. Evaluation of Karst rocky desertification based on thermal infrared remote sensing in Pingguo Country, Guangxi [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(6):952-956.

[23] 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[J].国土资源遥感,2010,22(2):59-62.doi:10. 6046/gtzyg.2010.02.13.

Li L, Tong L Q, Li X H. The remote sensing information extraction method based on vegetation coverage [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2010, 22(2):59 – 62. doi:10.6046/gtzyyg.2010.02.13.

- [24] 鞠建华,宋宏儒,周 萍.我国西南地区石漠化现状遥感调查
 [C]//全国国土资源与环境遥感技术应用交流会,2004.
 Ju J H,Song H R,Zhou P. Karst rocky desertification current survey in Southwest China[C]//National Land Resource and Environmental Remote Sensing Technology Conference,2004.
- [25] 赵丽苹. 基于 MODIS 数据的喀斯特地区石漠化时空演变特征研究[D].北京:中国地质大学(北京),2015.
 Zhao L P. Study on Developmental Characteristics of the Karst Rocky Desertification Based on MODIS[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing),2015.
- [26] 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.
 Xiong K N,Li P,Zhou Z F, et al. Karst Rocky Desertification Remote Sensing GIS Typical Research [M]. Beijing; Geological

Publishing House, 2002.

[27] 李 霞,徐涵秋,李 晶,等. 基于 NDSI 和 NDISI 指数的 SPOT 5 影像裸土信息提取[J]. 地球信息科学学报,2016(1):117 123.

Li X, Xu H Q, Li J, et al. Extraction of bare soil features from SPOT – 5 imagery based on NDSI and NDISI[J]. Journal of Geo – Information Science, 2016(1):117 – 123.

Assessment of Karst rocky desertification based on MODIS: Exemplified by Guizhou Province

WU Linlin^{1,2}, GUAN Yunlan^{1,2}, LI Jiawei³, YUAN Chenxin¹, LI Rui¹

(1. Faculty of Geomatics, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. Key Laboratory of

Watershed Ecology and Geographical Environment Monitoring, National Administration of Surveying,

Mapping and Geoinformation, Nanchang 330013, China; 3. South Digital Technology

Co., Ltd., Guangzhou 510665, China)

Abstract: Monitoring the spatial pattern and dynamic change of Karst rocky desertification has an important significance in Karst areas. In this study, the Karst rocky desertification evaluation model was established in Guizhou Province, which based on vegetation fractional coverage and degree of exposed bedrock using multi – temporal MODIS data, slope and population density as evaluation factors. The contribution of four factors was compared to accomplish the judgment matrix and calculate the weight by analytic hierarchy process. Karst rocky desertification evaluation model was established through consistency check. By this evaluation model, the spatial patterns of Karst rocky desertification and characteristics of conversion in different degree of desertification were acquired, the spatial – temporal evolution and dynamic change of Karst rocky desertification was improved dramatically from 2007 to 2016. The proportion of moderate rocky desertification and severe rocky desertification was the intermediary process of severe rocky desertification transform to light rocky desertification. It can firstly transform severe rocky desertification to moderate rocky desertification and then transform to light rocky desertification. (3)Moderate rocky desertification and light rocky desertification were active, whereas severe rocky desertification and the conversion rate was low.

Keywords: Karst rocky desertification; evaluation model of rocky desertification; rocky desertification of Guizhou Province; MODIS

(责任编辑:陈理)