

DOI: 10.5846/stxb201904030654

罗旭玲,王世杰,白晓永,谭秋,冉晨,陈欢,习慧鹏,陈飞,操玥,吴路华,李汇文,钟昕.西南喀斯特地区石漠化时空演变过程分析.生态学报,2021,41(2):680-693.

Luo X L, Wang S J, Bai X Y, Tan Q, Ran C, Chen H, Xi H P, Chen F, Cao Y, Wu L H, Li H W, Zhong X. Analysis on the spatio-temporal evolution process of rocky desertification in Southwest Karst area. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 680-693.

西南喀斯特地区石漠化时空演变过程分析

罗旭玲^{1,2,3},王世杰^{3,5},白晓永^{1,4,5,*},谭秋^{1,2,3},冉晨^{1,2,3},陈欢^{1,2,3},习慧鹏^{1,3,4},陈飞^{1,3},操玥^{1,3,4},吴路华^{1,3,4},李汇文^{1,3,4},钟昕²

1 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室,贵阳 550081

2 贵州师范大学地理与环境科学学院,贵阳 550001

3 中国科学院研究生院,北京 100049

4 中国科学院地球化学研究所普定喀斯特研究综合试验站,安顺 562100

5 贵州师范学院贵州省流域地理国情监测重点实验室,贵阳 550018

摘要: 喀斯特地区石漠化对当地社会经济的可持续发展有严重的阻碍作用,因此,研究喀斯特石漠化时空特征及演变规律,对石漠化治理有着重要的意义。以西南八省为研究区,利用归一化差分植被指数(Normalized Difference Vegetation, NDVI)、净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)、地表反照率(Surface Albedo)和坡度(Slope)数据,借助 ArcGIS 等软件平台,分析石漠化在不同的坡度、土地利用和生态保护区内的变化。结果显示:(1)轻度和中度石漠化是西南主要的石漠化类型。从空间分布来看,石漠化发生分布面积最广的是贵州,其次为云南和广西。(2)从不同土地利用来看,2000—2015 年间无石漠化面积最多,潜在石漠化次之。石漠化主要发生在耕地和林地两种土地类型上,其他土地上石漠化发生面积最少,但是极重度石漠化在其他用地上的发生比例很大,平均在 11%左右。(3)从不同坡度来看,石漠化严重程度不随坡度的增加而加剧,在坡度 6°—25°之间石漠化发生面积最大。(4)从生态保护区来看,2000 和 2015 年西南喀斯特生态保护区是石漠化面积分布最多的区域,分别为 27481.86 km² 和 21738.65 km²。最少的是大别山山地生态功能保护区,从变化量来看,增加最多的是三峡库区,增加 1641.22 km²,减少最多的是西南喀斯特生态功能保护区,减少 5743.22 km²。(5)利用 NPP、NDVI、地表反照率和坡度能较精准的反演石漠化,其反演权重依次为 0.33、0.42、0.15 和 0.1。研究时段内,西南生态环境逐渐得到改善。

关键词: 地表反照率;坡度;地理探测器;生态保护区;石漠化

Analysis on the spatio-temporal evolution process of rocky desertification in Southwest Karst area

LUO Xuling^{1,2,3}, WANG Shijie^{3,5}, BAI Xiaoyong^{1,4,5,*}, TAN Qiu^{1,2,3}, RAN Chen^{1,2,3}, CHEN Huan^{1,2,3}, XI Huipeng^{1,3,4}, CHEN Fei^{1,3}, CAO Yue^{1,3,4}, WU Luhua^{1,3,4}, LI Huiwen^{1,3,4}, ZHONG Xin²

1 State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

2 School of Geography and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China

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

4 Puding Karst Ecosystem Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences, Anshun 562100, China

5 Guizhou Provincial Key Laboratory of Geographic State Monitoring of Watershed, Guizhou Education University, Guiyang 550018, China

Abstract: Rocky desertification in karst areas has a serious impact on the sustainable development of local social economy.

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0502300,2016YFC0502102);“西部之光”人才培养计划(A类);喀斯特科学研究中心联合基金(U1612441)

收稿日期:2019-04-03; 网络出版日期:2020-11-27

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

Therefore, it is of great significance to study the spatial and temporal characteristics and evolution rules of rocky desertification in karst areas. In this paper, eight provinces in southwest China are taken as research area. Based on Normalized Difference Vegetation (NDVI), Net Primary Productivity (NPP), Surface Albedo and Slope data, and with the help of ArcGIS and other software platforms, the variations of rocky desertification in different slope, land use and ecological protection zones are analyzed. The results showed that: (1) Mild and moderate rocky desertification are main types of rocky desertification in the Southwest. From the spatial perspective, the distribution area of rocky desertification is the widest in Guizhou, followed by Yunnan and Guangxi. (2) From the perspective of different land uses, the area with no rocky desertification from 2000 to 2015 was the largest, followed by potential rocky desertification. Rocky desertification mainly occurred in the cultivated land and forest land types, the area of rocky desertification on other lands was the least, but the proportion of extremely severe rocky desertification on other lands was very large with about 11% on average. (3) From the perspective of different slopes, the severity of rocky desertification does not increase with the increase of slope, rocky desertification occurred in the maximum area between slope 6° and 25° . (4) From the perspective of ecological protection areas, karst ecological protection areas in southwest China in 2000 and 2015 were the most widely distributed areas of rocky desertification, covering 27481.86 km² and 21738.65 km² respectively. In terms of variation, the Three Gorges Reservoir area increased the most by 1641.22 km², while the southwest karst ecological function reserve decreased the most by 5743.22 km². (5) Rocky desertification can be accurately inverted by using NPP, NDVI, surface albedo and slope, with the inversion weights of 0.33, 0.42, 0.15 and 0.1 respectively. During the study period, the ecological environment in southwest China was gradually improved.

Key Words: surface albedo; slope; geographic detector; ecological protection area; rocky desertification

喀斯特石漠化是只在亚热带脆弱的喀斯特背景下的一种土地退化过程^[1-2], 表现为自然因素和人类活动综合作用下的地表植被破坏, 水土物质流失^[3], 土地生产力下降, 岩石大面积裸露类似荒漠化景观^[4]。石漠化带来的危害性严重^[5], 已成为我国西南地区生态可持续发展的屏障之一^[6-7]。因此, 精确找准石漠化空间分布, 合理划分石漠化等级是治理石漠化的关键^[8]。

为了能更好为石漠化治理服务提供理论基础, 众多学者对石漠化信息提取进行了研究, 马士彬等^[9]基于 Logistic-CA-Markov 模型对六枝特区进行了石漠化空间变化规律研究; 陈飞等^[10]对典型喀斯特槽谷区石漠化时空演变及未来情景模拟; 陈希等^[11]基于多源遥感数据的石漠化信息提取研究, 认为多源数据支持下的石漠化信息提取更准确; 李丽等^[12]利用中巴光学遥感数据提出了一种植被基于植被覆盖度的石漠化信息提取方法。但是, 以上方法更多的是局限于小区域, 若按照同样的方法对大尺度的区域进行石漠化解译, 数据的完整获取存在一定的困难。

所以, 为了探究石漠化信息提取方法是否在大尺度研究区域上也能得出较好的结果, 本文选择西南喀斯特地区为研究区, 利用归一化差分植被指数(NDVI), 植被净初级生产力(NPP), 坡度和地表反照率反演 2000—2015 年四期西南石漠化图, 分析其时空变化规律, 依据不同土地利用、坡度和生态保护区来对石漠化分布进行分析。以期在上述分析中能得出石漠化分布规律, 为研究区生态环境修复提供一定的依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

西南喀斯特地区包括贵州、云南、广西、湖南、湖北、重庆、四川、广东八省, 位于 102°E — 111°E , 23°N — 32°N , 北起秦岭山脉南麓, 南至广西盆地, 西至横断山脉, 东抵罗霄山脉西侧^[13], 面积约 54 万 km²^[14], 然而其地表喀斯特出露面积就达 51 万 km²^[15], 有 24 个生态功能保护区(图 1)。石漠化集中分布于黔、桂、云三个地区, 以黔地区石漠化面积高达 32427 km² 最为严重^[16]。年降水量在 1000 mm 以上, 属于亚热带季风湿润气候^[17]。该区域生态位置很重要, 其不仅是珠江源头以及长江水源的重要补给区, 还是南北水调水源区和三峡库

区^[18]。西南喀斯特环境的脆弱性和易伤性,以及不合理的人为活动,导致生态环境遭到严重破坏,引起一系列生态问题,例如,水土流失、森林生态系统退化、土地石漠化等^[19]。

1.2 数据来源及预处理

1:50000 岩性图来自喀斯特科学数据中心(<http://www.karstdata.cn/>),目的是为了裁剪出非喀斯特区域,减少石漠化发生区域的误判。

数值高程模型(DEM)和地表反照率数据获取自地理空间数据云(<http://www.karstdata.cn/>)。DEM 空间分辨率为 90 m,为了与其他数据拥有相同的分辨率,对其重采样为 1000 m,进行坡度提取,并把坡度分为 0°—2°、2°—6°、6°—15°、15°—25°、>25°,共 5 个等级。地表反照率空间分辨率为 1 km×1 km。

MODIS-NDVI 数据源于美国航空航天局(<https://www.nasa.gov/>)的地球观测系统数据集中的 MOD13Q1 L3 级数据产品,其空间分辨率为 250 m × 250 m,时间分辨率为 16d。应用 MODIS Reprojection Tools(MRT) 软件对原始数据的 hdf 格式转换为 tif 格式。

土地利用数据来自美国国家航空航天局(<https://www.nasa.gov/>),空间分辨率为 300 m × 300 m,为了减少数据量,在进行石漠化图生成前就已经利用湿地、水域和建设用地裁剪掉不发生石漠化的区域,所以在分析土地利用中石漠化变化时就没有列出湿地、水域和建设用地三种地类。

NPP 数据来源于美国 NASA EOS/MODIS 的 2000—2015 年产品(http://files.ntsg.umt.edu/data/NTSG_Products/MOD17/),空间分辨率为 1 km×1 km,以年为时间分辨率,单位为 kgC/m²,对下载好的 NPP 乘以 0.0001 得到实际值。

西南生态功能保护区数据来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。

以上数据均转换为相同的地理坐标(WGS_1984)和投影坐标(Albers Equal-Area Conic),并且空间分辨率统一采样为 1 km×1 km。

1.3 方法

1.3.1 石漠化解译路线

本文石漠化解译方法基于地理探测器,具体流程为:(1)准备好反演石漠化需要的基础数据,包括 NDVI、NPP、地表反照率、数值高程模型(DEM)和土地利用/土地覆盖变化(LUC) ,利用岩性图裁剪出喀斯特。由于认为 LUC 中的建设用地、湿地和水域不发生石漠化,所以,用建设用地、湿地和水域进一步裁剪,这样既减少石漠化发生在非喀斯特和不发生石漠化地区的误判,也减少数据量。(2)在 ArcGIS 平台根据已有的贵州省石漠化图进行样本点信息的提取,利用已有的石漠化样本点信息对裁剪好的 NDVI、NPP、坡度和地表反照率一一进行样本提取。对提取好的样本信息导出 ArcGIS 另存为表格。打开地理探测器进行权重分析,自变量选择石漠化信息,因变量选择四个变量,在 0.01 置信度内得出 NDVI、NPP、Slope 和 Surface Albedo 的 Q 分别为 46.2、36.3、11 和 16.5,根据 Q 值计算出相对贡献率,分别为 0.42、0.33、0.1 和 0.15(表 1)。(3)依据得出的因子权重反演出西南喀斯特地区 2000—2015 年间的四期石漠化空间图。基于王世杰^[20]等石漠化分级体系,将石漠化分为无石漠化、潜在石漠化、轻度石漠化、中度石漠化、重度石漠化和极重度石漠化,分别对应序号 1、2、3、4、5 和 6。

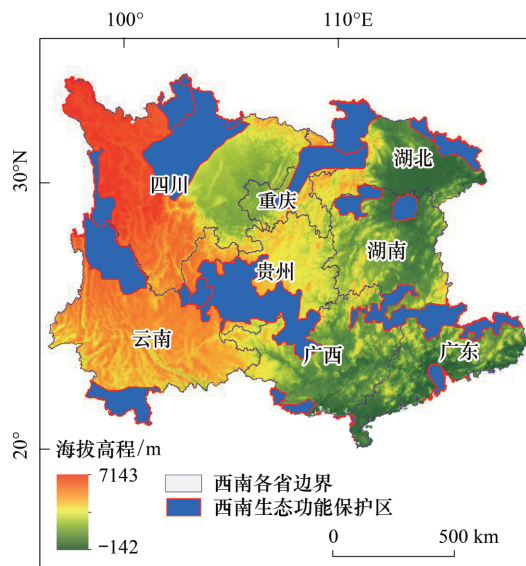


图 1 研究区地形图

Fig.1 Topographic map of the study area

表 1 石漠化各因子贡献率

Table 1 Contribution rate of various factors of rocky desertification

影响因子 Impact factor	归一化差分植被指数 NDVI	植被净初级生产车 NPP	坡度 Slope	地表反照率 Surface Albedo
Q	46.20	36.30	11.00	16.50
贡献率 Contribution rate /%	42	33	1	15

NDVI: Normalized difference vegetation index; NPP: Net primary Productivity

1.3.2 因子贡献率计算

地理探测器是探测和利用空间分异性的工具,由分异及因子、交互作用、风险区和生态探测四个部分组成^[21]。其分异及因子探测某因子 X 多大程度上解释了属性 Y 的空间分异。因此可以利用公式来计算反演石漠化的因子对其解释能力大小^[22]。表达式如下:

$$Q_{a,b} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^h \times N_i}{N \times \delta^2} \times \delta_i^2 \quad (1)$$

式中 a 为自变量 b 为石漠化图, N 为因变量的样本点总数, N_i 为自变量的样本点总数, δ^2 、 δ_i^2 分别为 a 和 b 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。

1.3.3 石漠化转移矩阵

石漠化转移矩阵能够清晰明了地反映研究区域石漠化的具体流向与各种石漠化等级的转入面积与转出面积^[10] 进而分析石漠化变化的数量特征。具体公式如式:

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: P_{ij} 为石漠化转移矩阵; n 为石漠化的类型数; i, j 分别为研究期初与研究期末的石漠化等级序号。

1.3.4 石漠化变化量和变化率

用变化量和变化率两个指标对石漠化变化进行定量分析^[23]。公式如下:

$$\Delta S = S_a - S_b \quad (3)$$

$$K = (U_a - U_b) / U_a \times 100\% \quad (4)$$

式中: S_a 和 S_b 分别表示前期和后期土地石漠化的面积, ΔS 和 K 分别表示 2000—2015 年间石漠化的变化量和变化率。如果变化量和变化率为负表示增加, 为正则表示减少。

2 结果与分析

2.1 石漠化时空分布

2.1.1 石漠化随时间的变化

由表 2 可知, 西南石漠化以轻度和中度为主, 其中两种等级石漠化面积之和占西南八省总面积的比例在 4 个时期分别为 76.76%、76.34% 和 79.83%、84.98%, 由比例可知, 轻度和中度石漠化面积在 2000—2005 年间减少, 2005—2015 年间增加, 总体呈现上升趋势。按照比例来看, 轻度先减少后增加, 总体呈上升趋势, 轻度比例依次为 41.80%、37.01%、42.58%、49.57%, 中度呈现增加的趋势, 比例依次为 34.96%、39.33%、37.25%、35.41%。

由表 3 可知, 2005、2010、2015 年间石漠化土地分别为 13.22 万 km^2 、12.03 万 km^2 和 10.70 万 km^2 , 国家公报 2005、2011、2016 年间石漠化土地分别为 12.94 万 km^2 、11.98 万 km^2 、10.06 万 km^2 。利用本研究减去公报石漠化土地面积得到石漠化的变化, 分别为 0.28 万 km^2 、0.05 万 km^2 、0.64 万 km^2 , 用变化面积除以本研究的面积得到变化率分别为 2.09%、0.38%、5.98%。

表 2 已发生石漠化不同等级面积变化

Table 2 Change of rocky desertification area at different levels

石漠化等级 Rocky desertification grade	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年	
	面积 Area/ 万 km ²	比例 Ratio/%	面积 Area/ 万 km ²	比例 Ratio/%	面积 Area/ 万 km ²	比例 Ratio/%	面积 Area/ 万 km ²	比例 Ratio/%
轻度石漠化 LKRD	4.95	41.80	4.89	37.01	5.12	42.58	5.31	49.57
中度石漠化 MKRD	4.14	34.96	5.20	39.33	4.48	37.25	3.79	35.41
重度石漠化 SKRD	2.21	18.70	2.66	20.13	2.10	17.46	1.25	11.67
极重度石漠化 ESKRD	0.54	4.54	0.47	3.53	0.33	2.71	0.36	3.35

LKRD: 轻度石漠化 Light Rock Desertification; MKRD: 中度石漠化 Medium Rock Desertification; SKRD: 重度石漠化 Severe Rock Desertification; ESKRD: 极重度石漠化 Extremely Severe Rock Desertification

表 3 石漠化时间变化

Table 3 Time change of rocky desertification

本研究 This study		石漠化公报 Rock desertification bulletin		变化量/(万 km ²) Amount of change	变化率/% Rate of change
年 year	面积 Area/万 km ²	年 year	面积 Area/万 km ²		
2005	13.22	2005	12.94	0.28	2.09
2010	12.03	2011	11.98	0.05	0.38
2015	10.70	2016	10.06	0.64	5.98

3.1.2 石漠化空间变化

由表 4 可知 2000—2015 年间贵州石漠化占比最大,分别为 31.46%、27.00%、25.10%和 27.66%;云南次之 28.01%、21.79%、23.61%和 26.36%;广西分别为 22.96%、18.00%、16.04%和 15.70%。从占比来看,整体呈现增加趋势的有湖南、湖北、重庆和四川,其中以 2010 年为节点,表现出先增加后减少;广州和其他地区石漠化占比呈现减少的现象,但是云南和广东以 2005 年转点,表现出先增加后减少,贵州也表现出减少的趋势,但是在 2010 以后也有增加。

表 4 石漠化分布比例/%

Table 4 Distribution ratio of rocky desertification

时间 Time	省(市) Province(City)							
	贵州	云南	广西	湖南	湖北	重庆	四川	广东
2000	31.46	28.01	22.96	4.63	3.87	3.62	3.45	2.02
2005	27.00	21.79	18.00	11.20	8.55	7.03	5.82	0.61
2010	25.10	23.61	16.04	11.89	9.06	7.73	6.07	0.50
2015	27.66	26.36	15.70	11.50	6.64	6.07	5.51	0.56

以贵州为中心向四周辐射的西南八省石漠化空间分布(图 2)显示,石漠化发生地区最明显的为贵州,云南和广西三个省份。石漠化发生可以分为两个时间段,即 2000—2005 年间是石漠化的增长阶段,2005—2015 年为石漠化减少阶段。研究时段内,贵州、云南、广西石漠化逐渐呈现减少趋势,其他区域呈现先增加后减少的趋势。

3.2 不同土地利用中石漠化变化

不同的土地利用类型中人类活动强度有很大的差异,由表 5 可知,2000—2015 年间无石漠化面积最多,潜在石漠化次之。石漠化主要发生在耕地和林地两种土地利用类型上,其他用地上石漠化发生面积最少,耕地和林地上无石漠化呈现增加趋势,草地和其他用地上的潜在石漠化情况则相反。

2000—2015 年间已发生石漠化面积变化,耕地上轻度石漠化先从 2000 年的 31989.49 km² 减少到 2005 年 30653.93 km²,然后又增加到 2015 年 31841.68 km²。中度石漠化从 2000 年 25636.75 km² 增加到 2005 年 26935.07 km²,然后又减少到 2015 年 22179.91 km²。重度石漠化从 2000 年 1999.33 km² 增加到 2005 年

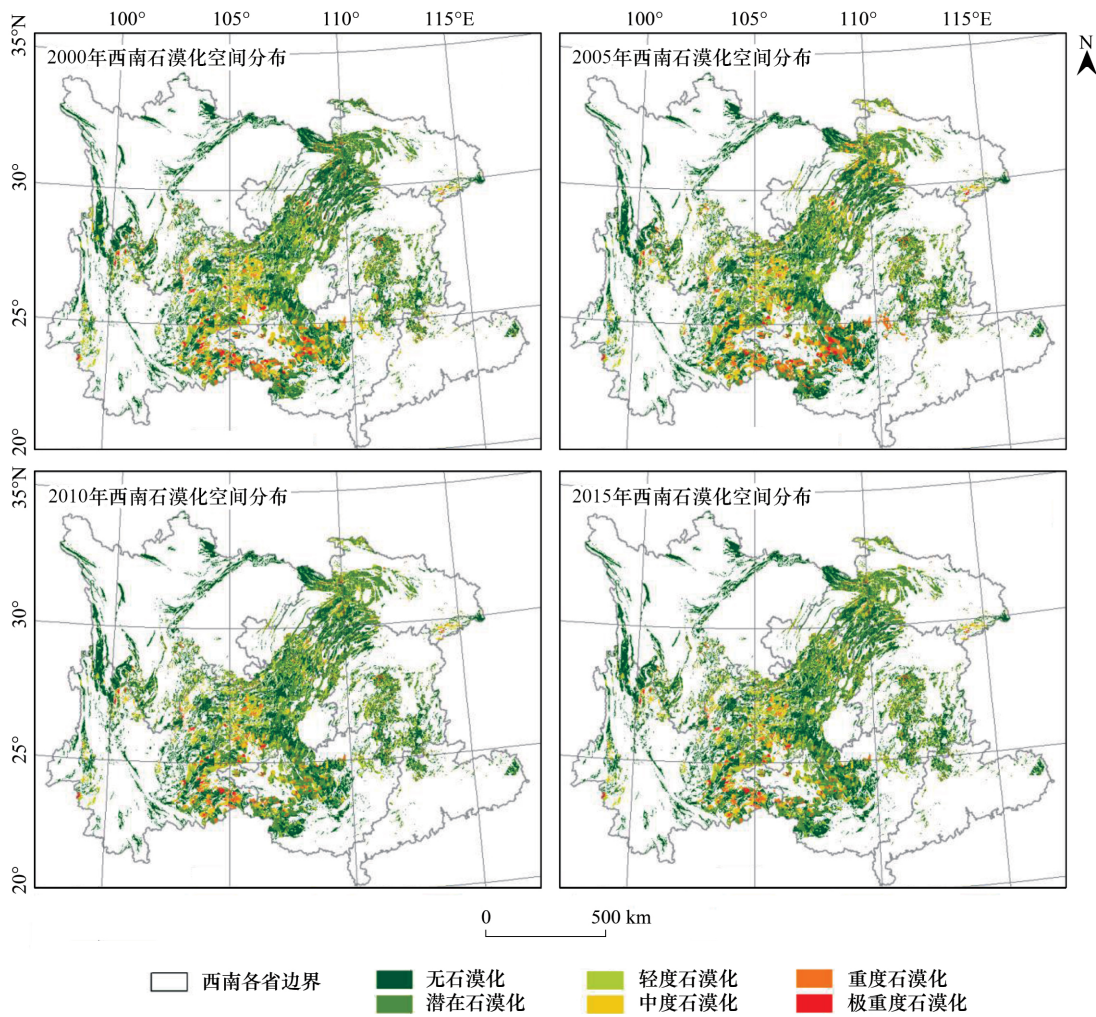


图 2 石漠化空间分布

Fig.2 Spatial distribution of rocky desertification

13663.93 km², 然后又减少到 2015 年 7462.70 km²。极重度石漠化呈现减少趋势。由表 5 可知 林地和草地大致与耕地上已发生面积变化一样, 呈现出轻度先减少后增加, 中度和重度先增加后减少, 极重度呈现减少趋势。其他用地中轻度、中度、重度和极重度石漠化呈增加趋势。发生石漠化的影响因素众多, 但是人类活动的强度也促进石漠化的加速形成, 所以 耕地中石漠化面积分布较多。

由图 3 可知 土地利用类型不同, 石漠化的分布具有很大的差异。从各石漠化等级面积比例来看, 不同的地类中比例最大的是无石漠化, 潜在石漠化次之。已发生从土地利用类型上的石漠化分布比例来看, 耕地上的石漠化发生比例最大, 草地次之, 然后是林地, 其他用地最少。因为耕地是人类活动较强的地类, 且很多耕地分布在一定坡度的地表上, 坡度越大, 地表覆盖的土层就越薄, 冲刷越强, 水土流失快, 所以石漠化发生面积较大。其他用地中的极重度石漠化比大, 其他用地一般为岩石裸露率大的难利用土地, 地表植被覆盖少, 土层薄, 极重度石漠化发生概率大。

3.3 不同坡度等级内石漠化分布

由表 6 可以看出, 不同坡度石漠化类型在不同时间段内的变化差异很大, 2000—2015 年间无石漠化在 6°—15°坡度上发生面积最大, 分别为 53580.7 km²、57962.97 km²、60238.36 km²和 59526.82 km²和 35146.43 km²。在 >25°坡度上最少, 分别为 4231.59 km²、4311.38 km²、4404.40 km²和 4373.18 km²。在 0°—6°坡度上的土地由于接近平地, 所以, 无石漠化面积也很大, 潜在石漠化分布与无石漠化分布具有相似的规律。已发生石

表 5 不同土地利用中石漠化变化
Table 5 Rocky desertification changes in different land use

石漠化类型 Rocky desertification type	年份 Year	土地利用上石漠化面积 /km ² Rocky desertification area on land use			
		耕地 Farmland	林地 Forest land	草地 Grazing land	其他用地 Other land
无石漠化 NKRD	2000	93392.17	99368.88	17114.12	139.46
	2005	99137.42	97419.92	17856.52	139.95
	2010	103330.99	99204.22	18110.82	145.17
	2015	103411.93	99586.09	18066.81	140.04
潜在石漠化 PKRD	2000	68970.63	68388.90	3777.06	2.63
	2005	61696.54	64401.52	3269.82	0.52
	2010	64804.96	67396.08	2949.02	0.25
	2015	68124.60	70878.16	3136.86	0.61
轻度石漠化	2000	31989.49	17057.42	2519.20	0.79
	2005	30653.93	16272.92	1814.18	1.32
	2010	30976.27	17711.92	2336.16	3.18
	2015	31841.68	21079.89	1933.66	2.65
中度石漠化	2000	25636.75	17151.53	2407.16	4.51
	2005	26935.07	22017.54	2805.97	5.13
	2010	23467.33	18592.28	2537.54	6.47
	2015	22179.91	14635.91	2093.98	5.22
重度石漠化	2000	11239.25	9526.70	1286.82	3.12
	2005	13663.93	11533.54	1214.86	4.51
	2010	11113.91	8996.33	806.03	5.02
	2015	7462.70	5595.43	1263.06	4.87
极重度石漠化	2000	2132.57	2637.29	767.88	19.11
	2005	1613.11	2564.92	460.70	19.57
	2010	1030.17	1543.84	349.54	21.34
	2015	1266.78	1698.20	588.51	20.39

NKRD: 无石漠化 Non-rock desertification; PKRD: 潜在石漠化 Potential rock desertification

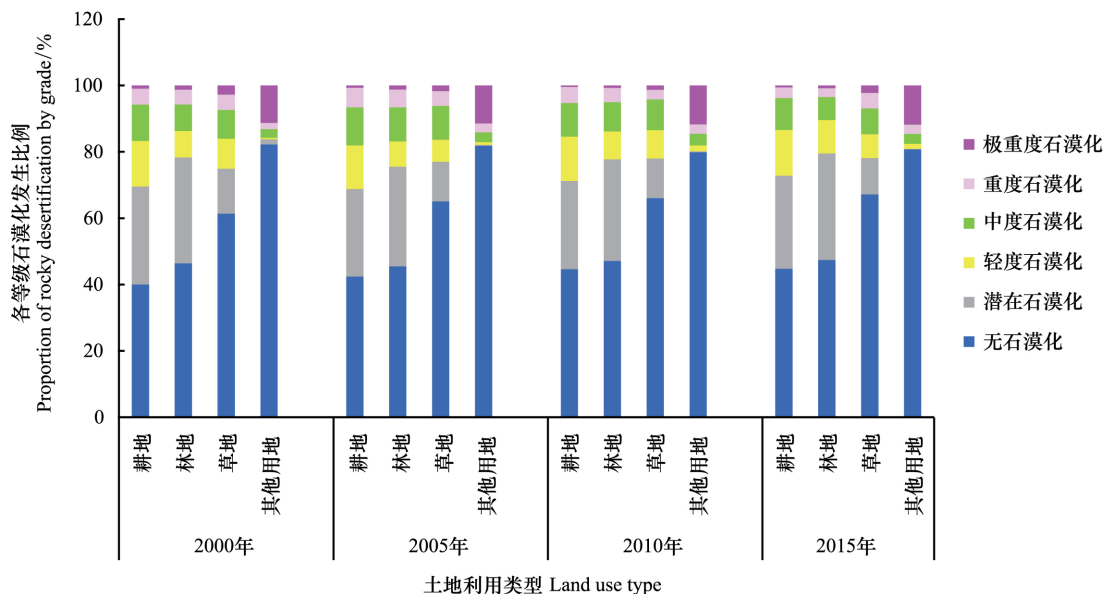


图 3 不同土地利用上石漠化面积比例

Fig.3 Proportion of rocky desertification area on different land uses

表 6 不同坡度中石漠化变化
Table 6 Rocky desertification changes in different slopes

石漠化类型 Rocky desertification type	年份 Year	不同坡度上石漠化面积/km ² Rocky desertification area on different slopes				
		<2°	2°—6°	6°—15°	15°—25°	>25°
无石漠化 2000	22457.47	39143.72	53580.70	12910.49	4231.59	
	2005	25060.87	43385.99	57962.97	13572.21	4311.38
	2010	25722.48	45205.39	60238.36	13936.96	4404.40
	2015	25739.04	45005.07	59526.82	13845.30	4373.18
潜在石漠化	2000	11559.12	29217.00	35146.43	8980.66	2135.18
	2005	9291.21	27017.46	33796.19	8662.98	1943.13
	2010	9908.40	28769.65	36238.24	9288.04	2045.20
	2015	10641.60	30282.93	38227.40	9604.08	2080.37
轻度石漠化	2000	6245.08	15069.29	16954.40	3789.95	852.25
	2005	5605.60	12853.18	13854.05	3121.38	805.21
	2010	5698.78	13215.42	14747.03	3607.87	1034.30
	2015	5806.67	13828.43	16056.45	3582.24	901.13
中度石漠化	2000	4691.65	12745.43	15776.06	3835.41	1099.07
	2005	4233.18	11537.86	14229.71	3875.10	1382.64
	2010	3727.26	9772.47	11900.78	3183.29	1123.58
	2015	3593.79	9279.78	11340.23	3168.69	1114.13
重度石漠化	2000	1999.33	5892.68	7794.53	1774.24	456.51
	2005	2833.58	7501.10	10232.04	2128.74	358.26
	2010	2081.27	5828.78	7917.53	1554.67	228.02
	2015	1284.87	4115.71	5202.01	1265.30	357.96
极重度石漠化	2000	314.15	1292.87	2143.14	647.35	268.16
	2005	242.36	1065.41	1951.52	577.68	242.14
	2010	128.61	569.28	1122.22	367.28	207.25
	2015	200.83	849.07	1493.78	472.50	215.99

漠化的土地在坡度上的面积分布从大到小依次为 6°—15°、2°—6°、15°—25°、<2°、>25°。轻度石漠化、中度石漠化、重度石漠化和极重度发生规律相似,都在 6°—15°坡度上达到最大值。但是 2000—2015 年间不同等级已发生石漠化在 6°—15°上具有不同的演变规律,其中轻度石漠化以 2005 年为节点先减少后增加,由 2000 年 16954.40 km²减少到 2005 年 13854.05 km²,减少了 3100.35 km²,后又增加到 2015 年 16056.45 km²,增加了 12956.10 km²。中度石漠化逐渐减少,由 2000 年 15776.06 km²减少到 2015 年 11340.23 km²,减少了 4435.83 km²。重点石漠化在 2000—2005 年间增加了 2437.51 km²,2005 至 2015 年间减少了 5030.03 km²。极重度也表现出逐渐减少的现象,2000—2015 年减少了 649.36 km²。

由图 4 不同坡度下石漠化占比可知,不同坡度内以无石漠化和潜在石漠化为主。已发生石漠化土地上,轻度石漠化主要分布在<25°坡度内,极重度石漠化随着坡度的变大逐渐增加。2000 年中度石漠化在>2°坡度土地上都有分布,重度石漠化在不同坡度都有发生。2005 年中度石漠化随着坡度的变陡逐渐增加,在>25°坡度上,中度石漠化大于轻度石漠化,重度石漠化主要分布在坡度<25°的土地上,在>25°坡度上的比例最小,坡度 6—15 范围内达到最大。2010—2015 年间中度石漠化随着坡度变大呈现增加的趋势,2010 年中度石漠化在随着坡度变大而增加,重度石漠化在坡度>25°的土地上占比最少。2015 年中度石漠化随坡度变大逐渐增加,其中>25°坡度的中度石漠化占比最大,重度石漠化主要分布在坡度>2°土地上。综上分析,石漠化主要发生在较为平坦的地方,喀斯特区域的山间坝子较少,平坦的地方土地利用率较高,人类活动更加频繁,随着坡度的增加,地表起伏变大,人类活动较少,石漠化发生的概率变小。

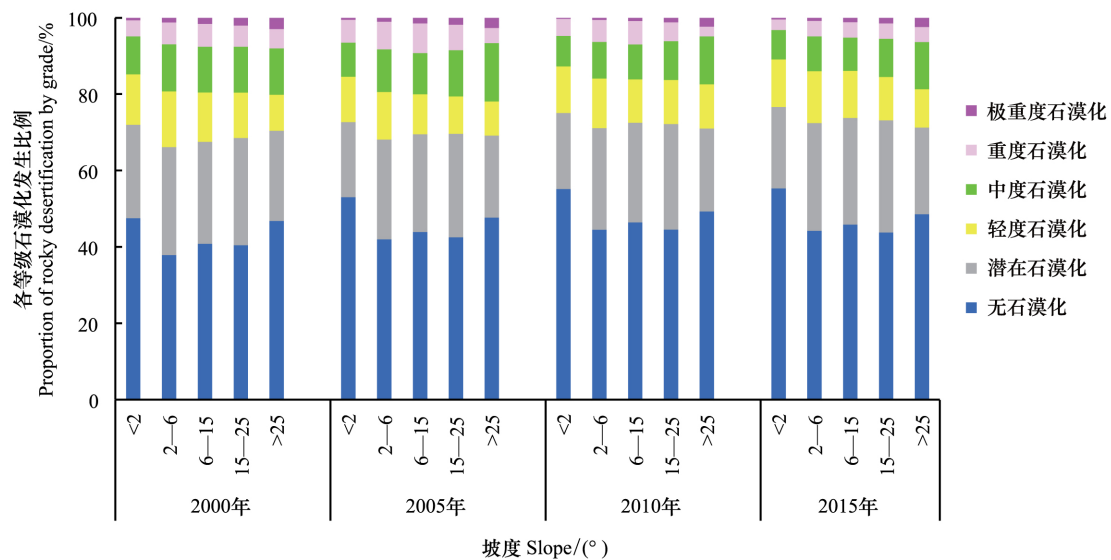


图4 不同坡度上石漠化面积比例

Fig.4 Proportion of rocky desertification area on different slopes

2.4 西南生态保护区石漠化变化

由表6可知,2000年和2015年生态保护区石漠化面积最大的是西南喀斯特区,面积分别为27481.86 km²和21738.65 km²。从石漠化变化量来看,呈现增加趋势的生态保护区有云南东川、三峡库区、岷山-邛崃山、南水北调中线工程区、大别山地区、武陵山地区。其中三峡库区增加最多,南水北调中线工程区次之,分别增加1641.22 km²、1466.29 km²,增加最少的是大别山,为0.51 km²。石漠化减少最多的生态保护区是西南喀斯特区5743.22 km²,南岭山地次之,减少393.34 km²,减少面积最少的是秦岭山地生态保护区,减少2.11 km²。从石漠化增加的变化率看,变化率最大的是岷山-邛崃山生态功能保护区,变化率为770.47%,大别山变化率为439.15%,南水北调中线工程区变化率为121.45%,变化率最少的是武陵山地区,变化率为6.81%。从石漠化减少的变化率来看,减少最多是横断山南部生态保护区,变化率为82.58%,桂西南石灰岩区变化率次之,为56.62%,变化率最少的是秦岭山地生态保护区,为8.09%。综上所述可知,石漠化减少最多或是增加最多的生态功能保护区不一定就是变化率最大,这说明石漠化生态修复呈现出边治理边恶化的情况,此外,石漠化生态修复不能只注意已经发生石漠化的区域,还应注意未发生石漠化区,要做到石漠化恶化地区得到改善,未发生石漠化地区得到预防。

由图5可知,不同的保护功能区内石漠化转移变化明显的是水土保持生态功能保护区。综上所述,2000—2015年间西南生态保护区是发生石漠化减少最大的地方,这是由于研究期间国家和政府开展一系列的生态工程,如2003年退耕还草工程、2005年集体林权制度改革、2008年石漠化综合治理、2014年全国生态保护与建设规划(2013—2020年)、2015年生态文明体制改革总体方案的等,这些生态修复工程对西南喀斯特石漠化的治理起着很大的作用。三峡库区生态功能保护区是石漠化增加最多的地方,石漠化公报显示2016年山峡库区石漠化土地面积为5630 km²,比2011年少了1040 km²,这与本研究的2015年三峡库区石漠化3436.79 km²相比,多2193.21 km²。

3 讨论

3.1 土地利用对石漠化空间分布的影响

西南喀斯特地貌分为中高山、断陷盆地、岩溶高原、岩溶峡谷、峰丛洼地、岩溶槽谷、峰林平原、溶丘洼地以及局部分布的石林等^[24-25]。奇特的地形地貌决定了喀斯特地区平原坝子会被城市、村镇居民点以及大型工

厂等利用, 耕种类型以山地旱地为主。土地利用类型以林地、耕地和草地为主^[26]。本研究得出林地与耕地中石漠化发生面积最多, 这与陈欢等研究万山石漠化与土地利用后, 指出发生石漠化的土地类型主要为旱地和林地(有林地、灌木林地)相符^[27]; 李阳兵等研究喀斯特地区土地利用与石漠化关系后, 指出石漠化土地中以灌木林地、低覆盖度草地、未利用地、山区旱地、石质旱地等土地利用类型占较大比例结果相近^[28]。耕地对石漠化的影响除了与人口密度有关外, 还与农村聚居的密集程度、单位面积上的壮劳力有关^[29]。但是, 其根本的原因是土地承载力低下, 人口压力超过了土地承载力, 洼地耕地资源不足, 迫使当地耕种坡耕地^[30]。因为人类在坡耕地的耕作活动不仅破坏了山地旱地的土壤肥力、抗侵蚀性、颗粒组成、水稳定团聚体、地表植被等^[25], 还促进了土壤地表、地下流失和生物流失, 间接驱动坡地石质化, 犁耕运移土壤和农耕促进土壤流失, 直接和间接的驱动坡地石质化^[31]。林地对石漠化的影响主要在于土地利用类型的转化。当植被从有林地向疏林地、灌木林地和草地转化时, 植被覆盖度慢慢降低, 景观类型变得单一, 生态系统稳定性差^[32], 土壤侵蚀发生, 引发石漠化景观产生。

表 7 西南生态保护区石漠化面积变化

Table 7 Change of rocky desertification area in southwest ecological protection area

生态功能保护区类型 Types of ecological reserves	2000 年	2015 年	2000—2015 年	
	石漠化面积 Rocky desertification area/km ²	石漠化面积 Rocky desertification area/km ²	变化量 Amount of change/km ²	变化率 Rate of change/%
秦岭山地	26.08	23.97	2.11	8.09
滇西北	2885.85	2568.17	317.68	11.01
珠江源(云南部分)	198.57	218.89	-20.32	-10.23
西南喀斯特	27481.86	21738.65	5743.22	20.90
三峡库区	1795.57	3436.79	-1641.22	-91.40
岷山-邛崃山	6.70	58.34	-51.64	-770.47
横断山南部	438.19	76.35	361.84	82.58
桂西南石灰岩	134.05	58.15	75.89	56.62
南水北调中线工程水源	1207.34	2673.64	-1466.29	-121.45
大别山山地	0.12	0.62	-0.51	-439.15
武陵山山地	720.29	769.37	-49.08	-6.81
南岭山地	2271.72	1577.78	693.94	30.55

3.2 坡度对石漠化空间分布的影响

石漠化发生较严重的地区主要分布在贵州西南部及云南东部一带, 因为该地区石灰岩比重较大、地表土层较薄、成土速率慢、降水丰沛、山地面积较广、耕地比重大。地表坡度大小决定了土壤侵蚀强度, 但是随着坡度的越来越大, 土壤侵蚀强度增加会使得地表土壤变薄, 基岩裸露, 石漠化发生。本研究得出潜在石漠化主要发生在 $<2^\circ$ 和 $>25^\circ$ 坡度上, 已发生石漠化主要发生在 $6^\circ-15^\circ$ 之间, 重度石漠化和极重度在 $>25^\circ$ 坡度上变化幅度较小。王明明等研究后寨河流域喀斯特石漠化演变特征及其关键表征因子与驱动因素后, 指出石漠化区域主要集中在 $2^\circ-22^\circ$ 坡度上^[33]。李阳兵等研究王家寨小流域石漠化与坡度的关系后, 指出石漠化集中分布在 $15^\circ-25^\circ$ 坡度范围内, 认为簸箩地区轻度、中度、强度集中分布在 $<5^\circ$ 、 $15^\circ-25^\circ$ 的坡度上^[34]。除此之外, 李阳兵等在研究了后寨河流域石漠化演变特征后, 指出 $15^\circ-25^\circ$ 、 $>25^\circ$ 坡度范围内的强度石漠化比例基本保持不变^[35]。周忠发等研究喀斯特地区石漠化与地形坡度关系后, 指出地形坡度陡, 人类活动频繁的地区石漠化面积大, 石漠化程度高^[36]。国家农业坡度上限为 25° , 也就是说 $>25^\circ$ 以上的耕地实施退耕还林还草政策。但是, 综合上述分析, 石漠化面积发生最大的坡度范围是 $6^\circ-15^\circ$, 在 $15^\circ-25^\circ$ 范围内石漠化发生也严重。因此, 石漠化严重区域可以适当的把退耕还林还草范围降得再低一点, 将喀斯特地区降低退耕还林坡耕地坡度标准为 15° ^[37]。

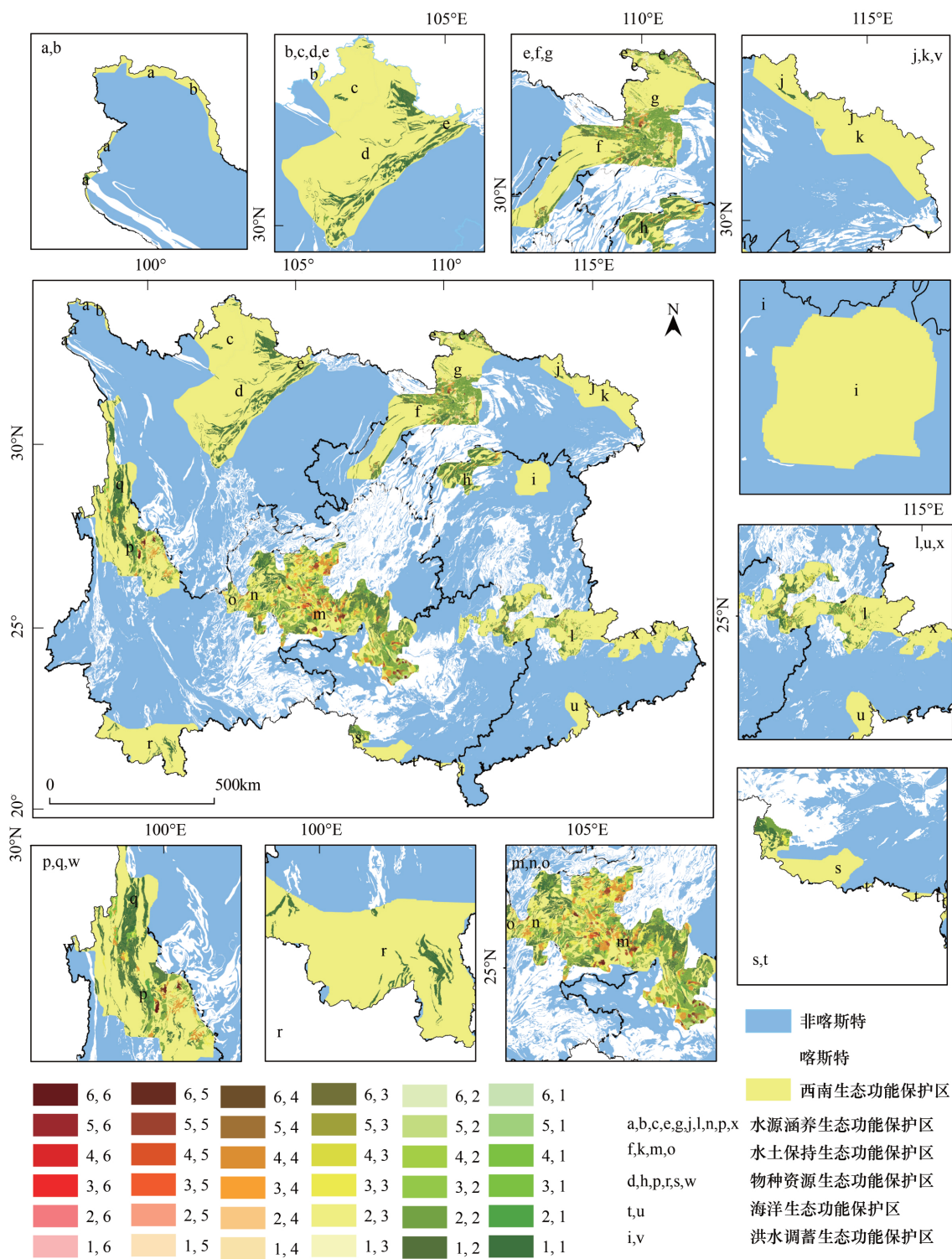


图5 西南生态保护区石漠化转移空间分布

Fig.5 Spatial distribution of rocky desertification transfer in southwest ecological reserve

a, 长江源生态功能区; b, 黄河源生态功能区; c, 若尔盖-玛曲生态功能区; d, 岷山-邛崃山生态功能区; e, 秦岭山地生态功能区; f, 三峡库区生态功能区; g, 南水北调中线工程水源区生态功能区; h, 武陵山地生态功能区; i, 洞庭湖区生态功能区; j, 淮河源生态功能区; k, 大别山地生态功能区; l, 南岭山地生态功能区; m, 西南喀斯特生态功能区; n, 珠江源(云南部分)生态功能区; o, 云南东川生态功能区; p, 滇西北生态功能区; q, 横断山南部生态功能区; r, 西双版纳生态功能区; s, 桂西南石灰岩生态功能区; t, 北部湾生态功能区; u, 珠江口生态功能区; v, 鄱阳湖生态功能区; w, 藏东南山地生态功能区; x, 江西东江源生态功能区

3.3 西南石漠化动态变化的影响因素分析

石漠化的发生除了存在复杂的自然因素,还有人类活动的影响。研究时段内石漠化演变存在 2000—2005 年的增加、2005—2015 年减少的两个阶段,但是石漠化整体情况呈现改善趋势。由图 6 可知,石漠化加剧阶段,研究区农村人口众多,对土地依附加强、土地需求较大,不合理的开垦方式,对森林的乱砍乱伐、林地减少。其次,洪水自然灾害的爆发,引起土壤大面积侵蚀发生,导致土地破坏、加剧洪涝灾害淤塞湖泊、影响开发利用,最大的后果就是引起石漠化的发生,导致土地石漠化加剧。石漠化的减少阶段,由图 6 可知,1999 年底“退耕还林还草”和西部地区“山川秀美”工程等生态修复政策得到实施^[38],2003 年退耕还草工程、2005 年集体林权制度改革和“绿水青山就是金山银山”的科学概论被提出、2008 年石漠化综合治理、2014 年全国生态保护与建设规划(2013—2020 年)、2015 年生态文明体制改革总体方案、2015 年国务院关于全国水土保持规划(2015—2030 年)的批复等生态修复政策的实施。随着城镇化的发展,大量农村人口外出务工、务农人员减少使得耕地逐渐撂荒;沼气、太阳能和液化气等普及,改变了传统的能源获取方式,提高了人们对现有能源的利用率,降低了人们对木柴资源的依附,减少对林地的砍伐和毁坏,林地得到增加,石漠化逐渐好转。

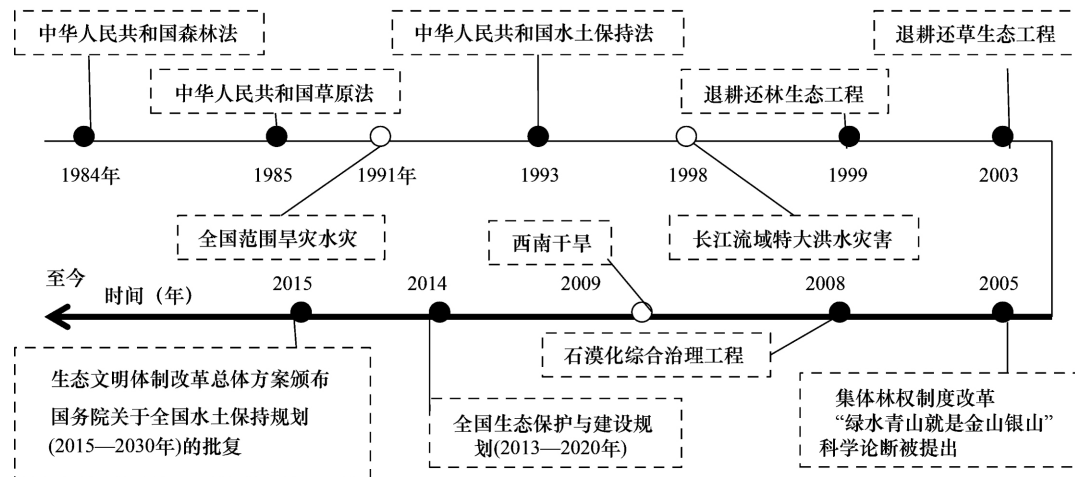


图 6 近 30 年石漠化发生的影响因素

Fig.6 Influencing factors of rocky desertification in recent 30 years

3.4 石漠化解译方法的优缺点

由表 5 可知,贵州省石漠化反演结果中,轻度石漠化为 22019.65 km²,中度石漠化为 3730.00 km²,重度石漠化为 3001.07 km²,极重度石漠化 700.57 km²。与陈起伟^[39]等人的结果对比,分别相差 3131.35 km²,1403.60 km²,728.93 km²,87.43 km²。2000 年贵州石漠化反演结果中轻度石漠化为 21924.83 km²、中度石漠化 12061.78 km²、重度石漠化 2525.29 km²、极重度石漠化 592.82 km²。依据李建存^[40]等人文献石漠化显示,其中重度包含了本文的重度和极重度石漠化,所以,石漠化对比分别为轻度、中度和重度,分别相差 1075.17 km²、1061.78 km²、118.10 km²。综合以上分析,本文石漠化结果误差在可控范围内,因此基于地理探测器得出反演石漠化因子权重进行石漠化解译具有一定的优点,使用方法简单,解译快速,结果覆盖范围广,数据易获取。缺陷在于石漠化分布结果图存在不确定性,因为采用的数据空间分辨率较低,喀斯特地区地表复杂,精度较低的石漠化图不能在小区域上得到精确地体现。在今后的研究中,我们将进一步加强石漠化解译的精度,争取反演解译出更精准的石漠化图,为生态治理提供一定的支撑。

5 结论

(1) 西南石漠化等级分布以轻度和中度为主。其发生比例变化先减少后增加,总体呈上升趋势。从空间分布来看,石漠化发生分布面积最广的是贵州,其次为广西和云南。研究时段内的石漠化发生具有两个时间

段,即 2000—2005 年的增加时段,2005—2015 年的减少时段。研究时段内,西南石漠化面积整体呈现改善趋势。

表 8 2005 年贵州石漠化对比

Table 8 Comparison of Rocky Desertification in Guizhou in 2005

年份 Year	数据来源 Data Sources	石漠化等级 Rocky desertification grade/km ²			
		轻度石漠化	中度石漠化	重度石漠化	极重度石漠化
2005	本研究 This study	22019.65	10018.40	3001.07	700.57
	陈起伟等 ^[39]	25151.00	11422.00	3730.00	788.00
	与本研究文相差	3131.35	1403.60	728.93	87.43
	本研究	21924.83	12061.78	2525.29	592.82
2000	李建存等 ^[40]	23000	11000	3000	
	与本研究文相差	1075.17	1061.78	118.10	

2000 年对比文献重度石漠化包括重度石漠化和极重度石漠化

(2) 从不同土地利用来看,2000—2015 年间无石漠化面积最多,潜在石漠化次之。石漠化主要发生在耕地和林地两种土地类型上,耕地因为人类活动很强,石漠化的发生比例最大。其他用地上石漠化发生面积最少,但是极重度石漠化在其他用地上的发生比例很大,平均在 11% 左右。

(3) 从不同坡度来看,石漠化的发生并不是随坡度的增加而呈现在正相关。各类型石漠化在坡度等级分布中的变化如下: <15° 坡度范围内,轻度石漠化以 2005 年最少,中度和极重度以 2015 年石漠化分布面积最少,重度石漠化以 2010 年最少; 15°—25° 坡度范围内的强度石漠化在 2000—2015 年也有发生,说明此坡度范围也受到垦殖等强烈人为干扰。>25° 各等级石漠化面积变化不大。总之,在坡度 6°—25° 之间石漠化发生面积最大。

(4) 从生态保护区来看,2000 和 2015 年西南喀斯特生态保护区是石漠化面积分布最多的区域,分别为 27481.86 km² 和 21738.65 km²,最少的是大别山山地生态功能保护区。从变化量来看,增加最多的是三峡库区,增加 1641.22 km²,减少最多的是西南喀斯特生态功能保护区,减少 5743.22 km²。

(5) 本文基于地理探测器得出的石漠化反演因子贡献率,NPP 为 0.33、NDVI 为 0.15、地表反照率为 0.42、坡度为 0.1。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] Bai X Y, Zhang X B, Chen H, He Y B. Using Cs-137 fingerprinting technique to estimate sediment deposition and erosion rates from Yongkang depression in the Karst region of Southwest China. Land Degradation & Development, 2010, 21(5): 474-479.
- [3] 戴全厚, 严友进. 西南喀斯特石漠化与水土流失研究进展. 水土保持学报, 2018, 32(2): 1-10.
- [4] 屠玉麟. 岩溶生态环境异质性特征分析——以贵州岩溶生境为例. 贵州科学, 1997, 15(3): 176-181.
- [5] 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理. 第四纪研究, 2003(06): 657-666.
- [6] 肖华, 熊康宁, 张浩, 张乾柱. 喀斯特石漠化治理模式研究进展. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(S1): 330-334.
- [7] Bai X Y, Wang S J, Xiong K N. Assessing spatial-temporal evolution processes of karst rocky desertification land: indications for restoration strategies. Land Degradation & Development, 2013, 24(1): 47-56.
- [8] 姚远. 喀斯特石漠化遥感信息提取方法综述. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(12): 64-67.
- [9] 马士彬, 张勇荣, 安裕伦. 基于 Logistic-CA-Markov 模型的石漠化空间变化规律研究. 中国岩溶, 2015, 34(6): 591-598.
- [10] 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.
- [11] 陈希, 兰安军, 熊康宁, 廖建军. 基于多源遥感数据的石漠化信息提取研究. 信阳师范学院学报: 自然科学版, 2018, 31(3): 437-442.
- [12] 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, (2): 59-62.
- [13] 陈洪松, 岳跃民, 王克林. 西南喀斯特地区石漠化综合治理: 成效、问题与对策. 中国岩溶, 2018, 37(1): 37-42.
- [14] 王世杰, 李阳兵. 喀斯特石漠化研究存在的问题与发展趋势. 地球科学进展, 2007, 22(6): 573-582.

- [15] 张军以,戴明宏,王腊春,苏维词,曹立国. 西南喀斯特石漠化治理植物选择与生态适应性. 地球与环境, 2015, 43(3): 269-278.
- [16] 苏维词. 中国西南岩溶山区石漠化的现状成因及治理的优化模式. 水土保持学报, 2002, 16(2): 29-32, 79-79.
- [17] 田秀玲,倪健. 西南喀斯特山区石漠化治理的原则、途径与问题. 干旱区地理, 2010, 33(4): 532-539.
- [18] 朱斌,刘丹一. 岩溶地区石漠化综合治理经验、问题及策略. 林业经济, 2015, 37(5): 76-81.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 袁道先. 西南岩溶石山地区重大环境地质问题及对策研究. 北京: 科学出版社, 2014.
- [25] 王正雄,蒋勇军,张远喁,段世辉,刘九缠,曾泽,曾思博. 基于 GIS 与地理探测器的岩溶槽谷石漠化空间分布及驱动因素分析[J]. 地理学报, 2019, 74(05): 1025-1039.
- [26] 黄启芬. 贵州喀斯特山区土地利用格局变化及土壤侵蚀效应——以大方县为例[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2015, 33(02): 18-23.
- [27] 陈欢,白晓永,李阳兵,罗光杰,习慧鹏,冉晨,罗旭玲. 铜仁市万山喀斯特地区石漠化演变及其对土地利用变化的响应[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(01): 24-35.
- [28] 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[J]. 资源科学, 2006(02): 67-73.
- [29] 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[J]. 山地学报, 2006(02): 242-248.
- [30] 李阳兵,罗光杰,白晓永,王永艳,王世杰,谢静,杨广斌. 典型峰丛洼地耕地、聚落及其与喀斯特石漠化的相互关系——案例研究[J]. 生态学报, 2014, 34(09): 2195-2207.
- [31] 张信宝,王世杰,孟天友,白晓永,姚建陆. 农耕驱动西南喀斯特地区坡地石漠化的机制[J]. 地球与环境, 2010, 38(02): 123-128.
- [32] 彭文君,舒英格. 基于 GIS 的石漠化山区县域土地利用空间变化的生态风险测度[J]. 水土保持研究, 2018, 25(01): 342-348.
- [33] 王明明,王世杰,白晓永,李世杰,李汇文,操玥,习慧鹏. 典型小流域喀斯特石漠化演变特征及其关键表征因子与驱动因素[J]. 生态学报, 2019, 39(16): 6083-6097.
- [34] 李阳兵,王世杰,周梦维,程安云,李卫海. 不同空间尺度下喀斯特石漠化与坡度的关系[J]. 水土保持研究, 2009, 16(05): 70-72.
- [35] 李阳兵,罗光杰,程安云,邵景安,白晓永,王世杰. 黔中高原面石漠化演变典型案例研究——以普定后寨河地区为例[J]. 地理研究, 2013, 32(05): 828-838.
- [36] 周忠发. 喀斯特地区石漠化与地形坡度的关系分析——以贵州省清镇市为例[J]. 水土保持通报, 2006(05): 1-3.
- [37] 中国科学院地球化学研究所. 地化所“中国石漠化治理与区域发展”院士咨询项目关于调整喀斯特山区坡耕地退耕还林坡度标准的建议被全国政协采用. [2017-09-07]. http://www.gyig.cas.cn/ydhz/hzdt/201709/t20170907_4856395.html
- [38] 周秋文,韦小茶,许幼霞,周旭,张继,梁建方. 清水河流域 1978—2010 年土地利用变化时空特征. 测绘工程, 2016, 25(11): 12-17.
- [39] 陈起伟,熊康宁,蓝安军. 基于“3S”的贵州喀斯特石漠化现状及变化趋势分析. 中国岩溶, 2007, 26(1): 37-42.
- [40] 李建存,涂杰楠,董立强,郭兆成. 贵州岩溶石漠化 20 年演变特征与影响因素分析[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(04): 133-137.