

# 基于 MODIS NDVI 的广西喀斯特石漠化演变特征

靖娟利<sup>1,2</sup>, 王永锋<sup>1,2</sup>

(1. 桂林理工大学 测绘地理信息学院, 广西 桂林 541004; 2. 广西空间信息与测绘重点实验室, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 为了研究广西喀斯特石漠化演变特征, 选择 2000、2004、2008、2012 年 MODIS NDVI 数据, 结合研究区的土地利用数据和土壤数据, 采用基于归一化植被指数(NDVI)的像元二分模型估算了研究区的植被覆盖度, 根据石漠化与植被覆盖度的对应关系, 反演了研究区不同时相的石漠化信息, 分析了石漠化总体演变特征、演变轨迹, 并探讨了石漠化演变与环境背景因素、气候因素、社会经济因素、石漠化治理政策因素的关系。结果表明: 1) 2000—2012 年研究区石漠化面积总体呈先迅速减少后又略有回升的趋势, 石漠化改善与恶化并存, 石漠化演变动态度最快的为轻度石漠化, 动态度为 3.73%; 2) 13 a 间, 石漠化演变轨迹为改善型的面积占喀斯特总面积的 11.60%, 反复型的占 9.54%, 恶化型的占 3.69%, 4 个研究时段均为石漠化的面积仅占 1.59%, 改善面积大于恶化面积; 3) 石漠化演变过程受环境背景因素、气候因素、社会经济因素、石漠化治理政策因素的共同影响。

**关键词:** 喀斯特石漠化; MODIS NDVI; 演变轨迹; 像元二分模型

**中图分类号:** X171; X87

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2015)02-0123-06

## Evolution Characteristics of Karst Rocky Desertification in Guangxi Based on MODIS NDVI

JING Juanli<sup>1,2</sup>, WANG Yongfeng<sup>1,2</sup>

(1. College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Spatial Information and Geomatics, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract:** In order to understand the evolution characteristics of karst rocky desertification in Guangxi, MODIS NDVI data of 2000, 2004, 2008 and 2012 were selected to estimate vegetation coverage in the study area by combining the data of land use with soil data of study area and using the dimidiate pixel model based on NDVI; the rocky desertification information of different phase in the study area were derived, the evolution characteristics and track were analyzed according to the corresponding relationship between rocky desertification and vegetation coverage. Relationships between karst rocky desertification and environmental background, climate, social-economic and rocky desertification control policy factors were discussed, respectively. The result showed that: 1) the overall trend of rocky desertification was rapidly reducing first and then recovering slightly in the study area from 2000 to 2012, improvement was compatible with deterioration, mild rocky desertification had the fastest change rate, dynamic degree was 3.73%; 2) during the 13 years, the improved type accounted for 11.60% of the total karst area, repeated type accounted for 9.54%, deteriorated type accounted for 3.69%, rocky desertification area of not variant type occupied only 1.59%, improved area was greater than the degraded area; 3) karst rocky desertification evolution was mutually influenced by the factors such as environmental background, climate, social-economic and rocky desertification control policy.

**Keywords:** karst rocky desertification; MODIS NDVI; evolution track; dimidiate pixel model

喀斯特石漠化(Karst Rocky Desertification, KRD)是指在亚热带脆弱的喀斯特环境背景下, 受人类不合理社会经济活动的干扰破坏, 造成土壤严

重侵蚀, 基岩大面积出露, 土地生产力严重下降, 地表出现类似荒漠景观的土地退化过程<sup>[1]</sup>。我国西南喀斯特地区是东亚喀斯特片区的核心部分<sup>[2]</sup>, 广西

是中国喀斯特地貌发育最典型、分布最广的地区之一,全区碳酸盐岩面积占土地总面积的40.9%,84个县市有碳酸盐岩出露,地质环境脆弱性大、敏感度高,且普遍经济落后、人口集中,属于全球变化敏感区,被列为与沙漠边缘地区等同的脆弱环境<sup>[3-4]</sup>。喀斯特石漠化已成为影响社会经济可持续发展的瓶颈。

近年来,随着对地观测系统技术的不断成熟,采用遥感技术进行不同尺度石漠化动态监测得到广泛应用。目前,国内学者已就喀斯特石漠化的成因与治理<sup>[5-6]</sup>、影响因素<sup>[7-9]</sup>、演变特征<sup>[10-12]</sup>等方面进行了研究,研究尺度多以典型的区域或流域为主,而以广西喀斯特分布区为整体,研究其石漠化演变特征的成果较少。鉴于此,本文以广西为研究对象,选择多时相MODIS NDVI数据,运用像元二分模型定量估算研究区植被覆盖度,反演石漠化信息,从宏观尺度上对喀斯特石漠化演变特征进行研究,以期对石漠化的有效治理提供参考资料。

## 1 研究区概况

广西地处中国南疆,位于东经104°26′—112°04′,北纬20°54′—26°24′,总面积23.67万km<sup>2</sup>。地势自西北向东南倾斜,属山地丘陵性盆地地貌。地处亚热带季风气候区,北回归线横贯全区中部,气候温暖,热量丰富。年平均气温16.0~23.0℃,由北向南递增,由河谷平原向丘陵山区递减。雨量丰富,水热同季,年降水量均在1070 mm以上,大部分地区为1500~2000 mm。降水量季节变化不均,4—9月为雨季,其降水量占全年降水量的70%~85%。土壤类型主要为黄壤、红壤和石灰土,按地带性分布。地带性植被以常绿阔叶林为主。水资源、矿产资源和旅游资源丰富,但地区贫富差距大。其人口、资源、环境与可持续发展一直是人们关注的焦点。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

研究选用美国NASA的MODIS Land products MOD13Q1(<https://lpdaac.usgs.gov/>),该数据为16 d合成的植被指数产品,空间分辨率250 m,时间序列选择2000年、2004年、2008年和2012年。此外,研究过程中还用到了土地利用和土壤等相关辅助数据。其中,土地利用数据采用MODIS12 Q1(<https://lpdaac.usgs.gov/>),该数据为年度土地覆被产品,空间分辨率500 m,时间序列选择2001年、2004年、2008年和2012年。中国土壤类型图,空间分辨

率1 km,数据来源于黑河计划数据管理中心、寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>)。碳酸盐岩类型数据来源于中国地质科学院编制的全国1:400万可溶岩分布图;岩溶地貌类型数据来源于中国地质科学院岩溶地质研究所编制的1:500万中国岩溶环境地质图。90 m分辨率的SRTM数据来源于<http://srtm.csi.cgiar.org/>。

### 2.2 研究方法

使用MRT(MODIS Reprojection Tool)软件对MODIS NDVI数据进行投影变换和拼接,将原有的正弦曲线(Sinusoidal)投影转换为等积圆锥(Albers Equal Area Conic)投影,基准面WGS\_1984。在ArcGIS10.2平台下,采用最大值合成法(Maximum Value Composites, MVC)对年中各旬数据取最大值,进一步消除云、大气、太阳高度角等的部分干扰<sup>[13-14]</sup>,得到研究区各时相NDVI最大值序列数据。以研究区岩溶区分布范围对数据进行裁剪。

在以上数据预处理的基础上,基于像元二分模型的理论和方法<sup>[15-16]</sup>,定量估算石漠化发生区的植被覆盖度。计算过程中,参考研究区土壤图和土地利用图,提取土壤和土地利用NDVI图,计算每种土壤和土地利用类型的NDVI频率累计值,取各土壤种类NDVI累计频率0.5%和各土地利用类型NDVI频率累计99.5%的值作为全土壤和全植被覆盖的NDVI值。参考植被覆盖度与石漠化之间的对应关系<sup>[17]</sup>,将其分为4级:无石漠化(植被覆盖度>70%,岩溶区)、轻度石漠化(50%<植被覆盖度<70%,岩溶区)、中度石漠化(30%<植被覆盖度<50%,岩溶区)和重度石漠化(植被覆盖度<30%,岩溶区)。研究2000—2012年石漠化演变特征、演变轨迹,并进一步分析其与环境背景因素、气候因素、社会经济因素、石漠化治理政策因素的关系。

## 3 结果与分析

### 3.1 石漠化演变特征

从表1和图1可知,广西喀斯特石漠化总面积总体呈先减少后略有增加的趋势,石漠化现象得到了有效遏制,局部地区有恶化趋势。2000年研究区石漠化总面积为1340768.8 hm<sup>2</sup>,占岩溶区总面积的17.10%,主要分布在桂中、桂西和桂东北地区;2004年石漠化总面积减少到883475.0 hm<sup>2</sup>,占岩溶区总面积的11.27%,主要分布区域与2000年大致相同,桂中和桂西部分地区逆转改善;2008年石漠化总面积持续减少到573356.3 hm<sup>2</sup>,占岩溶区总面积的7.31%,主要分布在桂中、桂西和桂东北部分地区,石

漠化现象得到显著改善;2012 年石漠化总面积增加至 704 800.0 hm<sup>2</sup>,占岩溶区总面积的 8.99%,在桂中和桂西等部分地区有加重趋势。

2004 年与 2000 年比较,石漠化面积整体呈减少趋势,石漠化总面积减少了 457 293.8 hm<sup>2</sup>,变化率为-0.34%;至 2008 年,石漠化面积持续减少 310 081.3 hm<sup>2</sup>,变化率为-0.35%。这 9 a 间,研究区石漠化面积得到了有效控制,生态环境显著改善。2008—2012 年,石漠化面积增加了 131 443.8 hm<sup>2</sup>;其中,轻度、中度和重度石漠化面积分别增加了 115 931.3,14 168.8,1 343.75 hm<sup>2</sup>,变化率分别为 0.21%,0.79% 和

0.85%。该时段研究区石漠化总面积略有回升,生态环境有恶化趋势。

石漠化演变是一个动态变化过程,其变化幅度和变化速率可以用土地利用动态度表示<sup>[11]</sup>。2000—2012 年石漠化面积和变化程度统计结果(表 1)表明,13a 间石漠化面积总体呈减少趋势,重度、中度和轻度石漠化面积均有不同程度减少,年均面积分别减少 16.83,320.67,48 583.17 hm<sup>2</sup>。石漠化演变动态度最快的是轻度石漠化,动态度为 3.73%,表示该区域土地利用变化比较剧烈。其次为中度石漠化和重度石漠化,动态度分别为 0.88%和 0.54%。

表 1 2000—2012 年广西喀斯特石漠化面积与变化程度

石漠化类型	面积/hm <sup>2</sup>				2000—2012 年		
	2000 年	2004 年	2008 年	2012 年	增加或减少 面积/hm <sup>2</sup>	年均增减 面积/(hm <sup>2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	动态 度/%
无石漠化	6498368.75	6955662.50	7265743.75	7134293.75	635925.00	48917.31	0.75
重度石漠化	3143.75	1850.00	1581.25	2925.00	-218.75	-16.83	-0.54
中度石漠化	36356.25	24206.25	18018.75	32187.50	-4168.75	-320.67	-0.88
轻度石漠化	1301268.75	857418.75	553756.25	669687.50	-631581.25	-48583.17	-3.73
石漠化	1340768.75	883475.00	573356.25	704800.00	-635968.75	-48920.67	-3.65

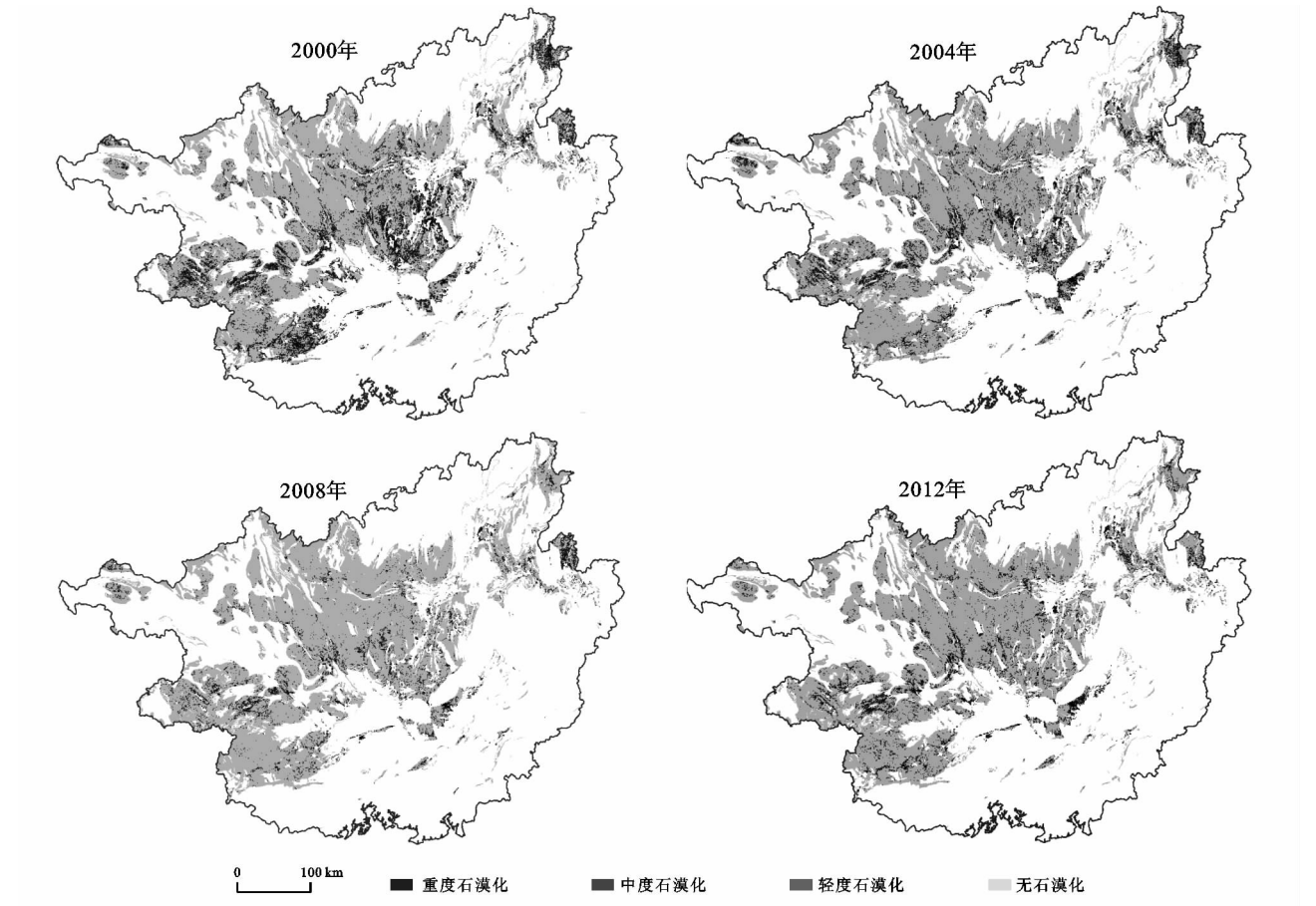


图 1 2000—2012 年广西喀斯特石漠化空间分布

3.2 石漠化演变轨迹

为了研究 2000—2012 年广西喀斯特石漠化的演变轨迹,在 ARCGIS 中运用地图代数运算对不同时

相的数据进行叠加,得到石漠化的演变信息。石漠化演变轨迹总数可根据石漠化类型和分析时相得到,本文中石漠化类型分为无石漠化、轻度石漠化、中度石

漠化和重度石漠化 4 类,分析时相为 2000 年,2004 年,2008 年和 2012 年,那么可能出现的变化轨迹种类为 4<sup>4</sup>,即 256 种轨迹。

为了简化运算,将石漠化类型进一步合并为石漠化和无石漠化 2 类,则石漠化的演变轨迹共计有 2<sup>4</sup>,即 16 种(表 2)。用数字“0”代表“无石漠化”,数字“1”代表“石漠化”,则石漠化的演变轨迹可用数字“0”和“1”的组合来表示。例如,在研究的 4 个时段石漠化的演变轨迹为“无—石—无—石”,可用组合“0101”表示。参考文献 12,根据石漠化的演变方向将演变类型归纳为无石漠化型、未变型、逆转改善型、反复型和恶化型 5 大类(表 2)。无石漠化型是指 4 个时间段均为无石漠化的类型,编码为“0000”;未变型是指 4 个时间段均为石漠化类型,编码为“1111”;逆转改善型是指研究时段初期为石漠化类型,在随后的时段逆转改善为无石漠化类型,编码包括“1000”、“1100”和“1110”;反复型是指研究时段初期为石漠化或无石漠化类型,在后续的时段两种类型反复转换,编码包括“0010”、“0101”等 8 种类型;恶化型是指研究时段初期为无石漠化类型,而研究时段末期演变为石漠化类型,编码包括“0001”、“0011”和“0111”3 种类型。

从表 2 和图 2 可知,石漠化演变轨迹为未变型的

面积仅为 124 968. 75 hm<sup>2</sup>,占岩溶区总面积的 1. 59%,集中分布在桂北、桂西及桂东南部;由石漠化逆转改善为无石漠化的面积为 909 168. 75 hm<sup>2</sup>,占岩溶区总面积的 11. 60%,集中分布在桂中、桂西和桂东南部;石漠化与无石漠化反复的面积 748 400. 00 hm<sup>2</sup>,占岩溶区总面积的 9. 54%,零星分布在桂中、桂西、桂东南部;由无石漠化退化为石漠化的面积为 288 862. 50 hm<sup>2</sup>,占岩溶区总面积的 3. 69%,零星分布于研究区。从整体来看,研究时段内石漠化改善面积大于恶化面积,石漠化得到了有效控制,生态环境总体得到改善。

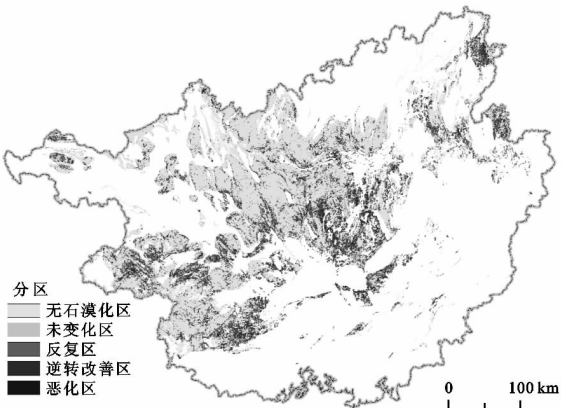


图 2 2000—2012 年广西喀斯特石漠化演变轨迹

表 2 2000—2012 年广西喀斯特石漠化演变轨迹统计

演变类型	编码	演变轨迹				面积/hm <sup>2</sup>	占岩溶区比例/%
		2000 年	2004 年	2008 年	2012 年		
无石漠化型	0000	无石漠化	无石漠化	无石漠化	无石漠化	5767687. 50	73. 58
未变型	1111	石漠化	石漠化	石漠化	石漠化	124968. 75	1. 59
	1000	石漠化	无石漠化	无石漠化	无石漠化	611925. 00	7. 81
逆转改善型	1100	石漠化	石漠化	无石漠化	无石漠化	210725. 00	2. 69
	1110	石漠化	石漠化	石漠化	无石漠化	86518. 75	1. 10
	0010	无石漠化	无石漠化	石漠化	无石漠化	112693. 75	1. 44
	0101	无石漠化	石漠化	无石漠化	石漠化	57893. 75	0. 74
反复型	0100	无石漠化	石漠化	无石漠化	无石漠化	223406. 25	2. 85
	1101	石漠化	石漠化	无石漠化	石漠化	92081. 25	1. 17
	1001	石漠化	无石漠化	无石漠化	石漠化	95206. 25	1. 21
	1011	石漠化	无石漠化	石漠化	石漠化	45781. 25	0. 58
	1010	石漠化	无石漠化	石漠化	无石漠化	73512. 50	0. 94
	0110	无石漠化	石漠化	石漠化	无石漠化	47825. 00	0. 61
恶化型	0001	无石漠化	无石漠化	无石漠化	石漠化	206818. 75	2. 64
	0011	无石漠化	无石漠化	石漠化	石漠化	42037. 50	0. 54
	0111	无石漠化	石漠化	石漠化	石漠化	40006. 25	0. 51

3.3 石漠化演变影响因素分析

喀斯特石漠化的演变过程受多种因素的影响,可能是地质、地形或地貌等因素,也可能是人类不合理的土地利用方式产生的结果。下文主要分析石漠化演变与环境背景、气候、社会经济、石漠化治理政策因

素的关系。

3.3.1 环境背景因素

1) 地层岩性:地层岩性为碳酸盐岩是石漠化产生的地质条件,但不同的碳酸盐岩岩层组合具有不同的沉积环境、物质成分,导致其孔隙率、渗透率和酸不

溶物含量有差异<sup>[7-8]</sup>,因此,对石漠化的演变具有差异性。广西喀斯特地区发生石漠化的地层岩性包括 5 类(图 3),纯灰岩(I 类)、纯白云岩(Ⅱ类)、灰岩与白云岩互层(Ⅲ类)、碎屑岩夹碳酸盐岩(Ⅳ类)和碳酸盐岩夹碎屑岩(Ⅴ类)。从图 3 可以看出,研究的 4 个时段中,石漠化发生区主要分布在地层岩性为 I 类和Ⅲ类的区域,而在地层岩性为Ⅱ类中分布最少。这是因为纯灰岩以方解石为主,酸不溶物小于 5%,成土速率远较侵蚀速率慢,极易形成石漠化,而白云岩富含 MgO,相对不易溶,岩溶作用较弱,抗石漠化能力较强<sup>[7]</sup>。因此,石漠化分布与碳酸盐岩岩性密切相关。

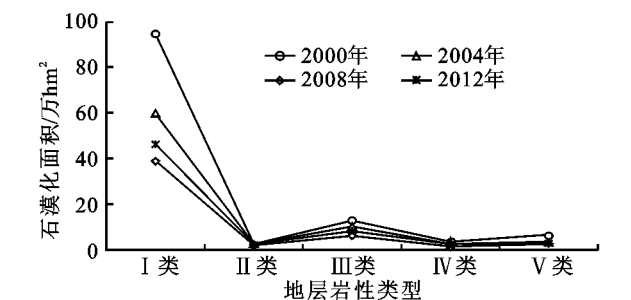


图 3 石漠化演变与碳酸盐岩类型的关系

2) 坡度:坡度等级对石漠化的发生具有重要影响。为了分析不同等级的坡度与石漠化演变轨迹之间的关系,采用研究区 90 m 分辨率的 SRTM DEM 数据派生得到坡度图,参考《水土保持综合治理规划通则,GB/T15772—1995》标准,将坡度分为 5 级:0°~8°,8°~15°,15°~25°,25°~35°和>35°。从图 4 可以看出,研究的 4 个时段中,坡度为 0~8°的区域石漠化分布比例最高,2000—2012 年所占比例依次为 63.83%,62.32%,64.38%和 66.17%,石漠化分布面积随着坡度的增加而减少。这是因为坡度为 0~8°区域是人类生产生活干扰最大的区域,再加上脆弱的地质环境背景,该区域石漠化极易发生。

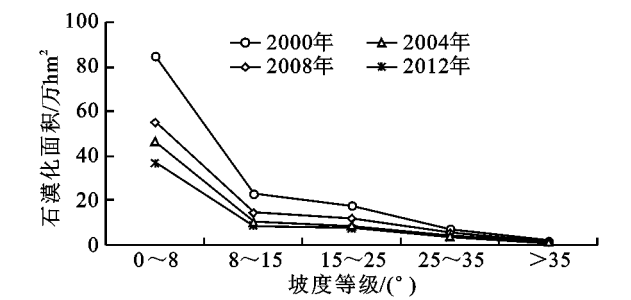


图 4 石漠化演变与坡度的关系

3) 地貌类型:广西喀斯特区地貌类型主要有峰丛洼地、峰林洼地、岩溶平原、岩溶丘陵 4 类,分别占岩溶区总面积的 30.40%,28.80%,29.58%和 9.59%,图 5 也反映了相同的分布趋势。从图 5 可以看出,石漠化区域主要分布在岩溶平原、峰丛洼地和峰林洼地 3 种地貌类型区。以 2000 年为例,不同地

貌类型区石漠化分布面积比例排序为:岩溶平原>峰丛洼地>峰林洼地>岩溶丘陵>岩溶槽谷>岩溶山地,4 个研究时段具有基本相同的分布趋势。因此,地貌类型对石漠化分布也有重要影响。

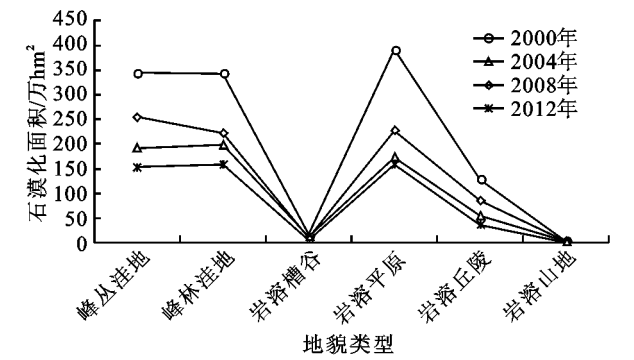


图 5 石漠化演变与地貌类型的关系

3.3.2 气候因素 根据广西气象站统计资料显示,2000—2011 年广西年均温度和降雨量呈减少趋势(图 6)。2000 年、2004 年、2008 年和 2011 年年均温度分别为 21.45℃,21.68℃,21.07℃和 20.96℃,年均降雨量分别为 1 066.60,1 102.22,1 509.63 和 1 023.90 mm。在对应的 4 个研究时段,温度变化不大,但降雨量有较大起伏,2000—2008 年研究区石漠化面积持续减少,至 2012 年略有增加。说明温度变化不大的情况下,降雨量的增加有利于植被恢复,为生态环境的改善提供有利条件。而 2009 年 10 月至 2010 年 5 月,广西喀斯特地区发生了严重旱灾,降雨量减少、地表温度升高,对植被生长产生了一定的抑制作用。因此,2012 年石漠化面积较 2008 年有所增加可能与气候因素有一定关系。

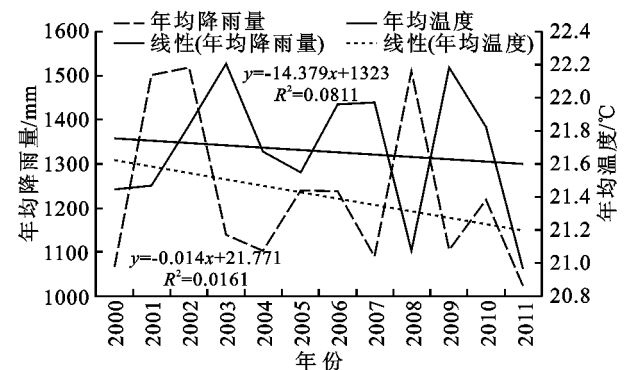


图 6 2000—2011 年广西年均降雨量、年均温度

3.3.3 社会经济因素 根据中国统计年鉴资料显示,广西 2000 年农村人口 3 414 万人,2004 年 3 339 万人,2008 年 2 978 万人,2012 年持续减少至 2 644 万人。由于计划生育政策的实施、外出打工人数的增加,自 2000 年以来,农村人口持续减少了 770 万人。同时,石漠化面积从 2000 年的 1 340 768.8 hm<sup>2</sup> 减少至 2012 年的 704 800.0 hm<sup>2</sup>。农村人口人均纯收入 2000 年为 1 964.51 元、2004 年为 2 305.22 元,2008

年增加至 3 690.34 元,2012 年持续增加到 6 007.55 元。农村人口数量减少、农民收入增加,降低了土地负荷,减少了乱砍乱伐、毁林开荒的现象,生态环境得到了有效改善。据此,农业人口的减少可能是石漠化改善的重要影响因素。

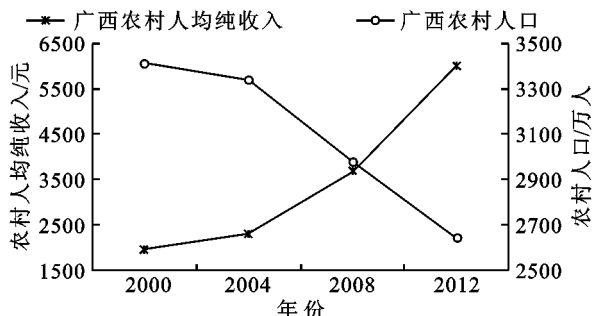


图 7 2000—2012 年广西农村人口及人均纯收入变化

3.3.4 石漠化治理政策 1999 年以来,国家实施多项石漠化治理工程,特别是黔滇桂喀斯特区石漠化综合治理工程。广西自 2001 年起实施退耕还林工程,到 2005 年共完成退耕还林任务 70.9 万  $\text{hm}^2$ ,工程覆盖全区 90 个县(市、区),以岩溶石漠化地区为工程重点,探索有效的石山造林模式<sup>[18]</sup>。有效的恢复了森林植被,减缓了水土流失,增加了农民收入,促进了农村产业结构调整。2004 年 8 月,国家发改委颁布了《关于进一步做好西南石山地区石漠化综合治理工作指导意见的通知》,提出了石漠化综合治理的五大工程措施,即生态修复工程、基本农田建设工程、喀斯特水开发利用工程、农村能源工程及生态移民工程<sup>[19]</sup>。2008 年,国务院批复了《喀斯特区石漠化综合治理规划大纲》,正式启动实施石漠化综合治理试点工程,广西 12 个县列为全国石漠化综合治理试点县。截至 2011 年底,试点工程实际治理石漠化面积 74 813.73  $\text{hm}^2$ ,其中,实施封山育林 68 458.7  $\text{hm}^2$ ,实施人工造林 2 017.1  $\text{hm}^2$ ,实施人工种草 1 215.37  $\text{hm}^2$ ,草地改良 530.2  $\text{hm}^2$ ,围栏封育草地 413.4  $\text{hm}^2$ <sup>[20]</sup>。石漠化治理政策取得了显著成效,植被覆盖度有所提高,生态环境得到改善。

## 4 结论

本文使用广西 2000 年、2004 年、2008 年和 2012 年 4 个时间段的 MODIS NDVI 数据,在研究区土地利用数据和土壤数据的辅助下,运用基于 NDVI 的像元二分模型计算了植被覆盖度,根据其石漠化等级的对应关系反演了研究区不同时间段的石漠化信息。研究中得到以下结论:

1) 250 m 分辨率的 MODIS NDVI 数据能从宏观尺度上对研究区的石漠化信息进行反演。2008 年

反演的石漠化等级空间分布与运用 30 m 分辨率的 Landsat 卫星影像提取的石漠化信息在宏观上具有一致的趋势<sup>[21]</sup>。但由于 MODIS NDVI 数据较低的空间分辨率,加上辅助的土地利用数据和土壤数据分辨率分别为 500 m 和 1 km,这对运用像元二分模型提取植被覆盖度,进一步反演石漠化信息的精度有一定的影响。

2) 2000—2012 年,研究区石漠化面积总体呈减少趋势,2000—2008 年石漠化面积持续减少,至 2012 年又略有回升,石漠化现象得到有效控制,这间接反映了国家及地方政府退耕还林还草工程的成效;但局部地区恶化趋势明显,这也说明了在人为活动持续干扰的状态下,石漠化很难实现逆转改善。

3) 13 a 间石漠化演变轨迹以逆转改善型占主导地位,其次为反复型,恶化型。研究时段内石漠化改善面积大于恶化面积,石漠化得到有效控制,生态环境得到显著改善。

4) 石漠化演变过程受多种因素的影响。环境背景因素是石漠化发生的内在条件。气候变化对植被覆盖有一定影响,从而影响石漠化演变。社会经济因素是石漠化演变的外在动力。石漠化治理政策能从一定程度上遏制石漠化的持续恶化趋势,促进生态系统的良性循环。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 兰安军, 张百平, 熊康宁, 等. 黔西南脆弱喀斯特生态环境空间格局分析[J]. 地理研究, 2003, 22(6): 733-741.
- [3] 周德全, 王世杰, 张殿发. 关于喀斯特石漠化研究问题的探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(2): 127-132.
- [4] 袁道先. 我国西南岩溶石山的环境地质问题[J]. 世界科技研究与发展, 1997, 19(5): 41-43.
- [5] 胡业翠, 刘彦随, 吴佩林, 等. 广西喀斯特山区土地石漠化: 态势、成因与治理[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 96-101.
- [6] 苏维词, 杨华, 李晴, 等. 我国西南喀斯特山区土地石漠化成因及防治[J]. 土壤通报, 2006, 37(3): 447-451.
- [7] 单洋天. 我国西南岩溶石漠化及其地质影响因素分析[J]. 中国岩溶, 2006, 25(2): 163-167.
- [8] 杨青青, 王克林, 陈洪松, 等. 地质地貌因素对喀斯特石漠化的影响[J]. 山地学报, 2009, 27(3): 311-318.
- [9] Liu Y, Wang J, Deng X. Rocky land desertification and its driving forces in the karst areas of rural Guangxi, Southwest China[J]. Journal of Mountain Science, 2008, 5(4): 350-357.

- tershed in Northern Shaanxi Province, China[J]. Journal of Mountain Science, 2011, 8(3):448-457.
- [2] Mupangwa W, Twomlow S, Walker S. The influence of conservation tillage methods on soil water regimes in semi-arid southern Zimbabwe[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2008, 33(8):762-767.
- [3] 张北赢,徐学选,刘文兆. 黄土丘陵沟壑区不同水土保持措施条件下土壤水分状况[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4):54-58.
- [4] 李萍,朱清科,赵磊磊,等. 黄土丘陵沟壑区鱼鳞坑雨季土壤水分状况[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7):76-81.
- [5] 吴普特. 人工汇集雨水利用技术研究[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2002.
- [6] 刘佳莉. 半干旱地区雨水高效富集利用技术应用[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2):230-232.
- [7] 朱强,李元红. 论雨水集蓄利用的理论和实用意义[J]. 水利学报, 2004(3):60-64.
- [8] 张新燕,蔡焕杰. 雨水集蓄利用研究进展[J]. 干旱区资源与环境, 2001, 15(3):87-92.
- [9] Broadbridge P, White I. Constant rate rainfall infiltration: A versatile nonlinear model: 1. Analytic solution [J]. Water Resources Research, 1988, 24(1):145-154.
- [10] Freeze R A, Harlan R L. Blueprint for a physically-based, digitally-simulated hydrologic response model [J]. Journal of Hydrology, 1969, 9(3):237-258.
- [11] Akan A O. Horton infiltration equation revisited[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1992, 118(5):828-830.
- [12] 杨永辉,赵世伟,雷廷武,等. 耕作对土壤入渗性能的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(5):1624-1630.
- [13] 刘贤赵,宿庆,宋孝玉,等. 黄土高原长武试区土地利用变化对产水量的影响[J]. 农业现代化研究, 2004, 25(1):59-63.
- [14] Bennie A T P, Hensley M. Maximizing precipitation utilization in dryland agriculture in South Africa; a review[J]. Journal of Hydrology, 2001, 241(1):124-139.
- [15] 李勇,徐晓琴,朱显谟,等. 黄土高原植物根系强化土壤渗透力的有效性[J]. 科学通报, 1992, 37(4):366-369.
- [16] 蔺君,汪有科,卫新东,等. 黄土丘陵区竹节式聚水沟的蓄水特性[J]. 应用生态学报, 2013, 24(12):3373-3380.
- [17] 许浩,蒋齐,潘占兵,等. 黄土丘陵区降雨,土壤水分和苗木成活率的关系[J]. 水土保持研究, 2012, 19(5):202-205.
- [18] 赵聚宝,梅旭荣,薛军红,等. 秸秆覆盖对旱地作物水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 1996, 29(2):59-66.
- [19] 刘贤赵,康绍忠. 降雨入渗和产流问题研究的若干进展及评述[J]. 水土保持通报, 1999, 19(2):57-62.
- [20] 陈洪松,邵明安,王克林. 黄土区荒草地和裸地土壤水分的循环特征[J]. 应用生态学报, 2005, 16(10):1853-1857.

~~~~~

(上接第128页)

- [10] Yang Q, Wang K, Zhang C, et al. Spatio-temporal evolution of rocky desertification and its driving forces in karst areas of Northwestern Guangxi, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 64(2):383-393.
- [11] 陈利,林辉,孙华. 基于 SPOT-5 影像的冷水江市岩溶区石漠化时空演变研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(8):22-27.
- [12] 李阳兵,王世杰,罗光杰,等. 喀斯特石漠化演变轨迹的典型案例分析:以贵州盘县为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(3):118-124.
- [13] Stow D A, Hope A, McGuire D, et al. Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 89(3):281-308.
- [14] Hope A S, Boynton W L, Stow D A, et al. Inter-annual growth dynamics of vegetation in the Kuparuk River watershed, Alaska based on the Normalized Difference Vegetation Index[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(17):3413-3425.
- [15] 邓飞,全占军,于云江. 20 年来乌兰木伦河流域植被盖度变化及影响因素[J]. 水土保持研究, 2011, 18(3):137-140.
- [16] 李小亚,张勃,靳自宝. 基于 MODIS-NDVI 的甘肃河东区植被覆盖度动态监测[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1):112-115.
- [17] 徐劲原,胡业翠,王慧勇. 近 10a 广西喀斯特地区石漠化景观格局分析[J]. 水土保持通报, 2012, 32(1):181-184.
- [18] 蒋忠诚,李先琨,胡宝清,等. 广西岩溶山区石漠化及其综合治理研究[M]. 北京:科学出版社, 2011.
- [19] 袁道先. 岩溶石漠化问题的全球视野和我国的治理对策与经验[J]. 草业科学, 2008, 25(9):19-25.
- [20] 莫剑锋,陆志星,黄永辉,等. 广西石漠化综合治理试点成效及经验剖析[J]. 福建林业科技, 2014(2):206-210.
- [21] 童立强,刘春玲,聂洪峰. 中国南方岩溶石山地区石漠化遥感调查与演变研究[M]. 北京:科学出版社, 2013.