

DOI: 10.5846/stxb201805061010

肖建勇,王世杰,白晓永,周德全,田义超,李琴,吴路华,钱庆欢,陈飞,曾成.喀斯特关键带植被时空变化及其驱动因素.生态学报,2018,38(24): 8799-8812.

Xiao J Y, Wang S J, Bai X Y, Zhou D Q, Tian Y C, Li Q, Wu L H, Qian Q H, Chen F, Zeng C. Determinants and spatial-temporal evolution of vegetation coverage in the karst critical zone of South China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(24): 8799-8812.

喀斯特关键带植被时空变化及其驱动因素

肖建勇^{1,2,3}, 王世杰^{1,3}, 白晓永^{1,3,*}, 周德全², 田义超¹, 李琴¹, 吴路华¹, 钱庆欢^{1,2},
陈飞^{1,2}, 曾成^{1,2}

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 550000

3 中国科学院地球化学研究所, 贵州省科技厅普定喀斯特研究综合试验站, 安顺 562100

摘要: 中国南方喀斯特地区广泛面临着生态问题, 植被的保护与恢复倍受关注, 对这一区域植被覆盖的进行监测和预测是非常必要的。以 MODIS-NDVI 为数据源, 分析 2000—2016 年间, 研究区不同地质背景, 多种土地覆被类型的 NDVI 时空变化特征及驱动因素。结果表明: (1) 从 2000—2016 年间, 研究区植被覆盖整体呈增长趋势; 其中喀斯特区域增长情况略优于非喀斯特区域。植被覆盖在空间上呈现东高西低; 其中林地的 NDVI 值最高, 耕地次之, 依次草地, 居民用地, 水域, 未利用地最低; 在林地和耕地中, 非喀斯特区域的 NDVI 值比喀斯特高, 其余的土地覆被类型中都比喀斯特区域低。(2) 研究区植被覆盖改善的地区占 60.19%, 退化地区占 17.06%; 草地, 耕地改善明显, 退化主要在水域和建设用地; Hurst 指数显示在研究区持续性改善的 NDVI 大于持续性退化; 相比非喀斯特区域, 喀斯特区域改善及持续性改善情况更佳。(3) 整体而言, 海拔对 NDVI 的空间分布影响力最大, 温度次之, 依次为降雨, 夜间灯光指数; 相比而言, 非喀斯特区域 NDVI 空间分布更易受地形因子影响; 喀斯特区域 NDVI 空间分布更易受气候差异及人类活动影响。(4) 研究区分别有 49%、45%、61% 的 NDVI 与气温、降雨、日照的相关系数通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验; 相比非喀斯特而言, 喀斯特区域植被生长更易受气候变化的影响。

关键词: NDVI; 喀斯特; Hurst; 地理探测器; 时空变化; 气候变化

Determinants and spatial-temporal evolution of vegetation coverage in the karst critical zone of South China

XIAO Jianyong^{1,2,3}, WANG Shijie^{1,3}, BAI Xiaoyong^{1,3,*}, ZHOU Dequan², TIAN Yichao¹, LI Qin¹, WU Luhua¹,
QIAN Qinghuan^{1,2}, CHEN Fei^{1,2}, ZENG Cheng^{1,2}

1 State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 99 Linceng West Road, Guiyang 550081, China

2 School of Geography and Environmental Sciences, GuiZhou Normal University, Guiyang 550000, China

3 Puding Comprehensive Karst Research and Experimental Station, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences and Science and Technology Department of Guizhou Province, Anshun 562100, China

Abstract: Ecological conservation and restoration in the karst critical zone of South China have recently gained considerable attention, thereby requiring the monitoring and forecasting of vegetation coverage in the district. In the present study, the moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) satellite time series (2000—2016), the Hurst exponent index, and a geographical detector were used to analyze the determinants and spatial-temporal evolution of vegetation coverage in

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: 2018-05-06; 修订日期: 2018-12-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: baixiaoyong@vip.skleg.cn

<http://www.ecologica.cn>

different geologic areas (karst and non-karst) and under different types of land use. (1) The regional vegetation of south China increased from 2000 to 2016 , and the growth rate of the karst areas was slightly higher than that of non-karst areas. Vegetation coverage increased from east to west presents the distribution pattern of the east high and west low in space. Forest land yielded the highest Normal Difference Vegetation Index(NDVI) value , followed by cultivated field , grassland , construction land , and water. Non-karst areas yielded higher NDVI values than did karst areas , except for areas classified as forest land or cultivated fields. (2) The results also suggest that 60.19% of the vegetation was maintained throughout the study period , whereas 17.06% of the vegetation degraded. In particular , the vegetation of grassland and cultivated fields ameliorated significantly , whereas that of areas classified as water or construction land degraded. According to the Hurst exponent index , the NDVI for sustainable maintenance is greater than that of sustainable degeneration. The proportion of sustainable maintenance was greater in karst areas than in non-karst areas. (3) Overall , Digital Elevation Model(DEM) exerted the greatest influence on the spatial distribution of NDVI , followed by temperature , precipitation , and the night-time light index , and the spatial distribution of NDVI was more strongly affected by topographic factors in the non-karst areas than in the karst areas. (4) NDVI was significantly correlated with temperature , precipitation , and sunshine (coefficients: 49% , 45% , and 61% , respectively) .

Key Words: NDVI; Karst; Hurst; geographical detector; spatial-temporal evolution; climate change

植被是连接大气、水体和土壤的纽带,也是陆地地表生态系统的核心组成部分^[1-3]。揭示植被覆盖的时空变化特征,并定量分析其变化与地理及气候等因子的相关性,对于深入研究植被与气候变化以及人类活动的内在关联、揭示区域环境状况的演化过程并预测未来发展趋势具有重要意义^[4-6]。

遥感数据已被越来越多地用于生态研究^[7-10],NDVI是当前广泛应用的表征植被覆盖的参数。通过NDVI的发展趋势和动态可以反应植被覆盖度的变化,生产力和健康状况^[11-16]。Myneni和Tucker分别分析了1981—1991年和1981—1999年的NDVI变化,发现北半球植被活动呈现增强趋势,中纬度地区尤为明显,并认为该增强趋势是因为气候变暖^[4,17]。方精云等利用NOAA-NDVI时间序列数据分析中国植被情况,得出1982—1999年植被活动在增强^[18];傅伯杰等采用FVC分析了2000—2010年中国植被覆盖的变化,发现中国经历了植被改善和退化,具有很大的空间异质性^[19]。Tong等分析2001—2013年植被覆盖的变化,发现中国国家和地方政府实施了一系列生态恢复项目使植被覆盖得到了恢复^[20]。马士彬等以SPOT-NDVI数据为基础结合植被类型、气象和石漠化数据,分析了贵州省喀斯特区域植被变化及驱动因素,认为从宏观角度分析植被变化与气候变化的关系时,必须权衡人为作用和气候变化对植被变化的影响^[21-22]。

以往研究普遍关注于植被整体的变化趋势;大多数研究基于GIMMS,SPOT等低空间分辨率影像数据^[23];针对不同土地覆被类型,不同海拔高度分析了植被覆盖的特征;然而,不同的在地质背景区,土层厚度及风化壳持水性等方面都存在显著差异,这些差异制约着区域水土资源的空间配置和养分的地球化学循环过程,进而影响植被的生长^[24-25];同时,在关于对植被时空变化驱动力因子的研究上,大量的学者只关注于海拔、降雨、温度等自然因子对植被分布的影响^[26-29];在人类活动对植被覆盖空间分布的研究相对粗浅;然而,人类活动对植被覆盖也有着显著的影响^[30-31]。中国南方是世界三大喀斯特集中连片分布区之一,喀斯特是中国南方乃至全球不可忽视的重要组成部分;空间上普遍存在着地质背景的差异^[32-34];近些年来,国家及地方政府开展了许多生态环境修复、治理工程^[20];人类活动对植被的影响不容忽视,开展植被覆盖的研究对中国南方生态环境恢复情况评估具有重要意义。

鉴于此,本文以中国南方喀斯特关键带区域为研究对象,基于MODIS-NDVI 250m分辨率的遥感数据,揭示2000—2016年NDVI时空演变规律,分析不同地质背景,多种土地覆被类型NDVI的差异;采用趋势分析法分析不同土地覆被的植被变化趋势,采用Hurst指数分析持续性;采用地理探测器定量分析地形(海拔、坡向、坡度)、气候(温度、降雨、日照)等自然因子、灯光指数等人类活动因子对植被空间分布的影响;采用相关分析

法,分析气候变化对植被的驱动。本文可为研究区喀斯特区域的生态修复提供科学依据和理论支持。

1 材料和方法

1.1 研究区

本文以中国南方喀斯特关键带为研究区,在行政区上包含云南省、贵州省、四川省、重庆市、湖北省、湖南省、广西区、广东省共八个省市(97°21′—117°19′E, 20°13′—34°19′N),总面积 193.82 万 km²。该区地跨中国地貌的三级阶梯,地势西高东低,包含川西高原、云贵高原、横断山脉、四川盆地、洞庭湖平原、两广丘陵等多个一级地貌单元,地貌条件复杂。同时是世界三大喀斯特集中连片分布区之一,喀斯特区域占区域总面积的 27.36%(图 1)。气候兼具低纬气候、季风气候、山原气候的特点,各地年平均气温在-1—25℃之间,年日照数在 900—2600h 之间,年降水量 500—2500mm 之间,自然环境类型多样,植被主要有针叶混交林、耕地植被、灌丛、高原草甸等。研究区存在普遍的土壤侵蚀、石漠化等生态问题。

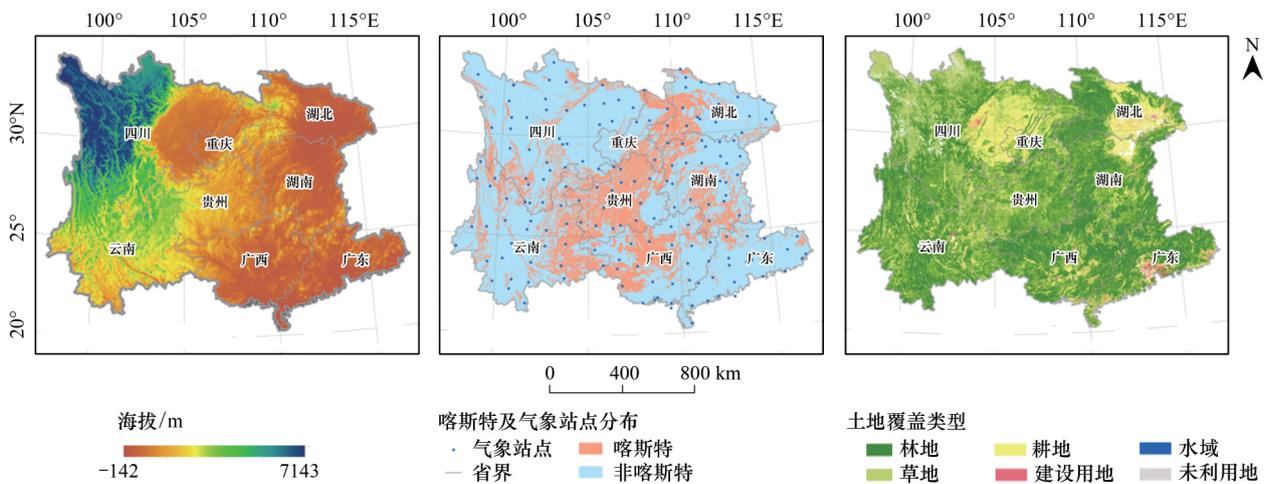


图 1 研究区地形图、喀斯特及气象站点分布图、土地覆盖类型图

Fig.1 Topography, lithology and land use of the study area

1.2 数据及来源

本文中 NDVI 数据源于美国宇航局(NASA)的 MODIS 植被指数产品数据 MOD13Q1。该数据基于最大值合成法,为 16 天合成的空间分辨率 250m³ 数据产品,投影为正弦曲线投影。该研究选取 2000—2016 年的影像为对象。气象数据来源于国家气象信息中心,DEM 数据来源于地理空间数据云 90m 分辨率原始高程数据;夜间灯光指数数据来自国家地球物理数据中心;土地覆被数据来自中国科学院资源环境科学数据中心(表 1),土地覆被类型参照《土地利用现状调查技术规程》中的一级分类划分^[35],考虑喀斯特地区灌丛和低矮树林混杂难分,导致园地和林地的区分度低;数据空间分辨率低导致居民用地和交通用地区分度低等,本文将土地覆被类型划分为林地、草地、耕地、水域、建设用地、未利用地。

1.3 研究方法

探讨 NDVI 的时空演变规律利用 MOD13Q1 的影像。首先,利用 NASA 提供的 MODIS Reprojection Tools (MRT) 对产品数据批量进行拼接和投影变换;采用均值处理,将每年 23 期影像合成年值。分析 2000—2016 年际变化情况;以 17 年 NDVI 的平均值代表研究区的平均植被覆盖情况,分析研究区域 NDVI 的空间分布特征时;采用一元线性回归方程斜率 K 值模拟植被覆盖的年际变化趋势;利用 Hurst 指数指示变化趋势的变化持续性。采用空间分析等方法得到海拔、坡度、坡向地形空间分布数据;通过克里金空间插值法将研究区 183 个气象站点每年气象数据计算的得到基于像元的温度、降雨、日照空间分布数据,以夜间灯光指数表征人类活动强度的差异;基于以上 7 个因子,采用地理探测器定量分析因子对 NDVI 空间分布的影响;采用相关分析

法,分析温度、降雨、日照为代表的气候变化对植被的驱动(图2)。

表 1 主要数据来源
Table 1 Themain data sources

数据 Data	网站 Website	分辨率 Resolution	链接 Link
行政界线 Administrative boundary	国家地球系统科学数据共享平台	—	http://www.geodata.cn/
MOD13Q1	美国地质调查局	250m	http://glovis.usgs.gov/
海拔 Digital Elevation Model	地理空间数据云	90m	http://www.gscloud.cn/
气象数据 Meteorological data	国家气象信息中心	—	http://data.cma.cn/
夜间灯光指数 Night light	国家地球物理数据中心	1000m	http://ngdc.noaa.gov/eog/dmsp/downloadV4composites.html
土地覆被类型 Land use	中国科学院资源环境科学数据中心	100m	http://www.resdc.cn/

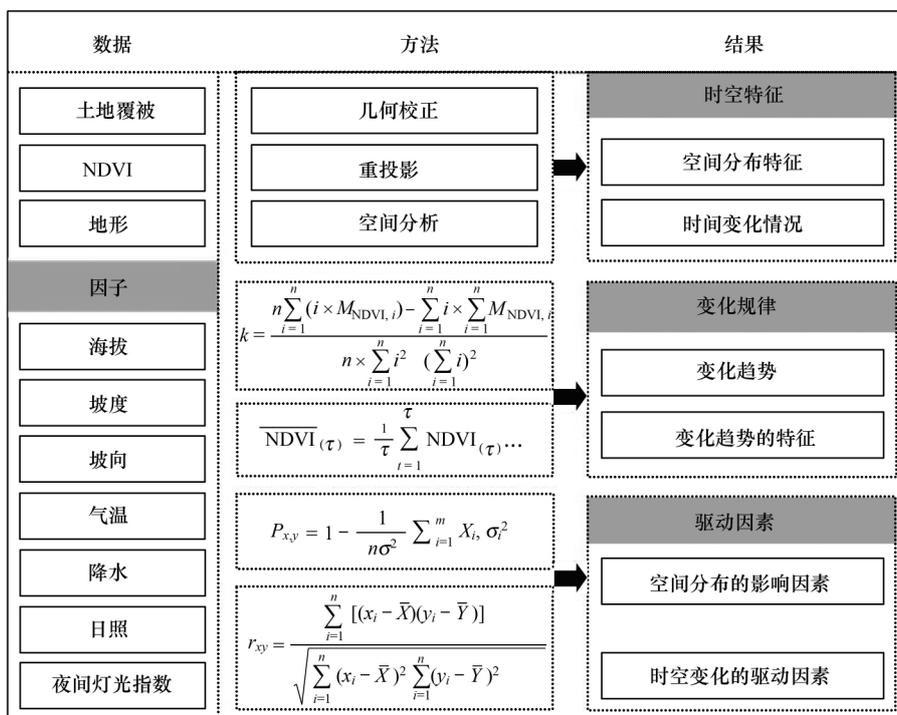


图 2 技术路线图

Fig.2 Flowchart of spatial-temporal evolution of vegetation and its driving Forces

1.3.1 一元线性回归方程

NDVI 的年际变化趋势,以各栅格多年数值最小次方线性回归方程的斜率表示^[36],具体公式如下:

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^n (i \times M_{NDVI_i}) - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n M_{NDVI_i}}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \tag{1}$$

式中 k 代表 NDVI 的斜率,当 $k > 0$ 时,说明植被覆盖 17 年间的变化趋势是增加的;反之,则减少; k 值越大表示 NDVI 变化越趋势明显。式中: n 为 17; i 为年序号, M_{NDVI_i} 为第 i 年的 NDVI。当前 k 值变化趋势的划分并没有统一标准,考虑研究区中 NDVI 的整体分布情况通过计算 k 值的变化,研究发现 k 值基本符合正态分布,便于研究,将植被覆盖变化划分为 5 个等级,分别为:显著退化 ($k \leq -0.01$);轻度退化 ($-0.01 \leq k < -0.05$);稳定不变 ($-0.05 \leq k < 0.05$);轻度改善 ($0.05 \leq k < 0.01$);显著改善 ($k > 0.01$)^[37]。

1.3.2 Hurst 指数

Hurst 指数作为一种定量描述长时间序列信息依赖性的有效方法^[38] 近年来在植被变化研究中得到了广泛的应用。

考虑 NDVI 时间序列 $NDVI_t, t=1, 2, 3, 4, \dots, n$, 对于任意正整数 $t \geq 1$, 定义该时间序列的均值序列:

$$\overline{NDVI}_{(\tau)} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} NDVI_{(i)} \quad \tau=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

计算累计离差为:

$$X_{(t, \tau)} = \sum_{i=1}^t (NDVI_{(i)} - \overline{NDVI}_{(\tau)}) \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (3)$$

极差序列为:

$$R_{(\tau)} = \max_{1 \leq t \leq \tau} X_{(t, \tau)} - \min_{1 \leq t \leq \tau} X_{(t, \tau)} \quad \tau=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

标准差序列为:

$$S_{(\tau)} = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} (NDVI_{(i)} - \overline{NDVI}_{(\tau)})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \tau=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

计算 Hurst 指数如下:

$$\frac{R_{(\tau)}}{S_{(\tau)}} = (c\tau)^H \quad (6)$$

(6) 式中 H 即为 Hurst 指数, 对于公式两边同时取对数得到 Hurst 经验公式。基于时间序列并利用 Hurst 经验公式得到一簇 H 值进行最小二乘法拟合, 得出的直线斜率即为修正后的 Hurst 指数(H)。

Hurst 指数(H 值) 可以反映 NDVI 时间序列的随机性或持续性特征, 当 $0.5 < H < 1$ 时, 时间序列具有长程依赖性, 表现为持续性, 即未来变化与过去的变化趋势一致, 过去为增加趋势的区域在将来也将继续增加, 反之亦然, 且 H 越接近 1, 持续性越强; 当 $H=0.5$ 时, 则说明 NDVI 时间序列为随机序列, 不存在长期相关性; 当 $0 < H < 0.5$ 时, 则表明时间序列具有反持续性, 即未来的变化趋势与过去的变化趋势相反^[39]。

1.3.3 地理探测器

本文采用王劲峰等人研发的地理探测器, 其原理是以空间变异理论、空间叠置技术和集合论为基础^[40], 通过比较因变量与自变量因子地理图层空间一致性, 判定自变量因子对因变量取值变化贡献大小的度量方法, 度量指标为因子贡献力 P :

$$P_{X,Y} = 1 - \frac{1}{n\sigma^2} \sum_{i=1}^m X_i \sigma_i^2 \quad (7)$$

式中 Y 分别表示因变量, 即本文中的 NDVI 等级; X 为自变量因子, 即本文中的海拔、坡度、坡向、气温、降水、日照时数、夜间灯光指数; σ^2 与 n 表示 Y 的栅格值方差和栅格总数; σ_i^2 、 n 和 m 分别表示 X 的第 i 类栅格值方差、栅格数和类型总数。因子贡献力取值范围为 0—1 之间, 0 表示自变量因子与因变量完全无关, 1 表示自变量因子完全控制因变量^[40]。

1.3.4 相关分析法

植被与气温、降水、日照、夜间灯光指数相互关系的测定主要是通过相关系数的计算与检验来完成的^[41]。相关系数的数学表达式为:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}} \quad (8)$$

式中 n 为样本数; 变量 x_i 表示因子; 变量 y_i 表示 NDVI; \bar{X} 、 \bar{Y} 分别为变量 x_i 和变量 y_i 的均值; r_{xy} 为变量 x_i 和变

量 y_i 的相关系数。本研究基于长时间序列的气候数据,对气温、降雨、日照、夜间灯光指数和 NDVI 相关关系逐像元进行分析,同时对相关系数进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 植被覆盖的时空变化特征

2000—2016 年间,研究区植被整体呈增长趋势,增长率为 0.0028/a。NDVI 值在 0.5420—0.5950 之间波动,NDVI 的 17 年平均值为 0.5686,在研究时间内,2005 和 2012 年的 NDVI 值最低;2016 年的 NDVI 值最高。地质背景的差异会影响植被的生长水平^[42,24],将喀斯特与非喀斯特区域分别统计分析。其中,喀斯特区域 NDVI 值在 0.52—0.66 之间波动,平均值为 0.61,NDVI 整体趋势上升,增长率为 0.0028/a。非喀斯特区域 NDVI 值在 0.5420—0.6100 之间波动,平均值为 0.5736,NDVI 整体趋势上升,增长率为 0.0036/a。非喀斯特区域 NDVI 的变化情况与喀斯特区域相似,年均值为 0.5670;增长率为 0.0025/a,略低于喀斯特区域(图 3)。

由于自然条件和人类活动共同影响研究区植被覆盖的空间格局,年平均 NDVI 表现出明显的区域分异,如图 3 空间分布图表明:研究区整体上植被覆盖呈现东高西低,南高北低的空间分布特征。从土地覆被类型来看,研究区的林地占比较高,且 NDVI 值主要分布在 0.4—0.8 区间,草地、耕地的 NDVI 值都主要分布 0.4—0.6 区间;城镇、水域的 NDVI 值都分布 0.4—0.6 区间;未利用地的 NDVI 值都分布较离散,整体值偏低。在喀斯特区域,NDVI 整体空间分布与研究区相似。以有林地(0.5985)的 NDVI 值为最高,耕地(0.5526)次之,草地(0.5373)、居民用地(0.5015)、水域(0.4718)、未利用地(0.2923)最低(表 2)。非喀斯特区域表现出相同的规律,其中喀斯特区域林地和耕地的 NDVI 值除低于非喀斯特区域;草地、水域、建设用地及未利用地的 NDVI 值高于非喀斯特区域。

表 2 统计不同土地覆被类型的 NDVI 值

Table 2 Comparison of NDVI values under different land use types

	土地覆被类型 Land use types	Normal Difference Vegetation Index (NDVI)	面积比例 Area ratio/%	分配比例 Allocation ratio/%				
				<0.2	0.2—0.4	0.4—0.6	0.6—0.8	≥0.8
喀斯特	林地	0.5985	55.77	0.05	0.60	25.73	29.39	0.01
Karst	草地	0.5373	18.81	0.33	1.36	11.78	5.34	0.00
	耕地	0.5526	23.48	0.01	0.50	17.00	5.98	0.00
	水域	0.4418	0.85	0.00	0.13	0.59	0.13	0.00
	建设用地	0.4815	0.69	0.04	0.08	0.41	0.16	0.00
	未利用地	0.2923	0.39	0.15	0.13	0.10	0.02	0.00
非喀斯特	林地	0.6242	50.03	0.12	1.04	14.63	34.21	0.03
No-karst	草地	0.4798	17.56	0.81	4.13	8.11	4.50	0.00
	耕地	0.5542	26.66	0.10	0.79	19.15	6.61	0.00
	水域	0.4271	2.42	0.41	0.50	1.26	0.26	0.00
	建设用地	0.4568	1.98	0.05	0.57	1.16	0.19	0.00
	未利用地	0.2843	1.36	0.44	0.53	0.36	0.02	0.00

2.2 植被覆盖变化趋势特征分析

2000 年至 2016 年间,植被覆盖度呈现整体上升趋势(即改善区域面积>退化面积)。显著改善(13.17%)的植被主要分布在贵州西部、四川东南部、云南东北部的林地、草地、耕地区;轻度改善(47.02%)占比较大,在研究区内广泛分布;显著退化(2.71%)的区域主要集中于各省人口密集的建设用地区;轻度退化(14.35%)和稳定不变(20.75%)的植被相对均匀的分布与各个省市和各个土地覆被类型(如图 1、图 4 和图 5)。喀斯特区域的植被改善的比例(68.21%)略高于非喀斯特区域(57.17%)。

整个研究区的 Hurst 指数(从 0—0.98),平均值为 0.47,标准差为 0.10。在本研究中,Hurst 小于 0.5 的面

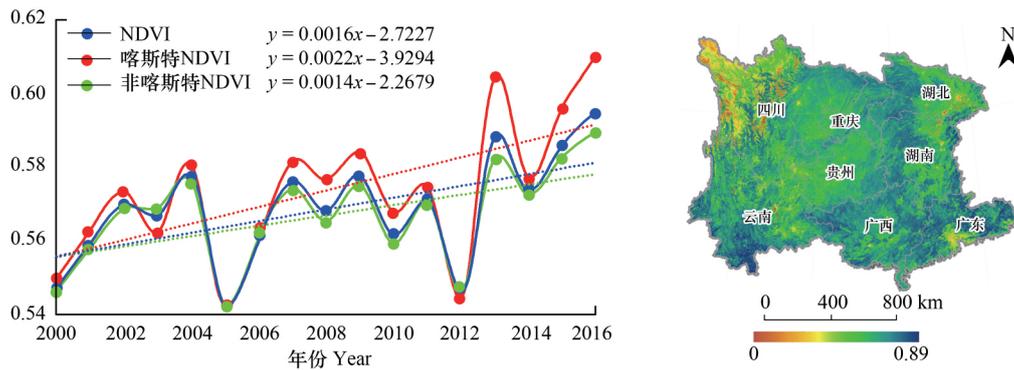


图3 2000—2016年中国南方喀斯特及非喀斯特地区NDVI年际变化及年均NDVI空间分布图

Fig.3 South of China and karst , Non-karst value of NDVI from 2000 to 2016 , and NDVI average spatial distribution characteristics

积比例为(56.82%) (表3),意味着这些区域未来变化趋势不具持续性。将NDVI的动态趋势与Hurst指数叠加,得到NDVI的变化特征分布图(图4)。持续性和显著改善的植被覆盖面积占研究区总面积的5.79%,主要位于贵州西部,四川东南部,云南东北部的草地,耕地;持续性和显著退化的植被覆盖较少,所占比例为1.47%,分布与广西东北部,湖南北部等居民用地区,非喀斯特区域比喀斯特表现更为明显;持续性和稳定不变的植被覆盖占9.85%,持续性和轻度改善的植被覆盖占19.63%,持续性轻度退化的植被覆盖占6.44%,变化趋势不确定的植被覆盖占56.82%,都相对均衡的分布于各个地貌类型中(图5)。喀斯特区域的植被持续性改善的比例(27.03%)略高于非喀斯特区域(24.82%)。

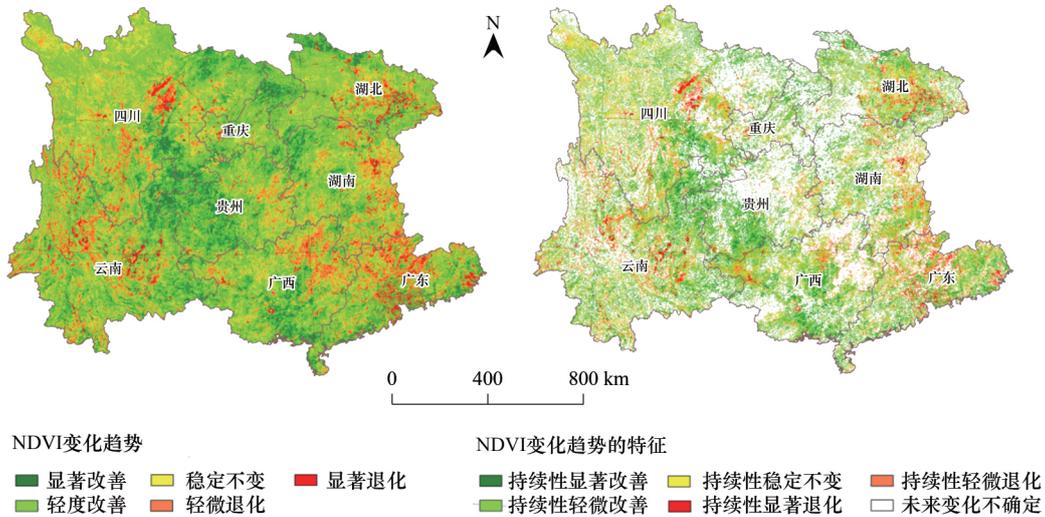


图4 2000—2016年研究区NDVI变化趋势和变化趋势特征图

Fig.4 Trends of NDVI and the distribution of NDVI variation characterin South of China from 2000 to 2016

2.3 植被覆盖空间分布影响因素分析

分析NDVI的空间分布的驱动力,本文选取地形因子:海拔,坡度,坡向;气象因子:气温,降雨,日照;人类活动因子:夜间灯光指数。研究区的海拔值(-142—7143m)呈现从西北到东南的降低之势(图1);坡度介于0—80°,陡坡主要位于研究区西北部的高山草地;东部及四川盆地耕地的坡度较缓。温度(从-1.4—24.1℃),整体呈现从西北到东南的增大之势。降雨(从500—2407mm)整体呈现从南到北的降低之势。日照(800—2640h)以四川盆地省、贵州省日照值偏低,云南省,四川东部较高。夜间灯光指数表现人类活动强度;以广州市经济发达人口稠密区最高,其他省会城市次之,人口稀少的西北部等地区最低(图6)。

表 3 植被 NDVI 变化趋势特征面积比例
Table 3 Contrast between vegetation NDVI change trend and the Hurst exponent Index

K	赫斯特 Hurst	变化趋势特征 Change trend characteristics	面积比例 Area ratio/%
$K \leq -0.01$	>0.5	持续性显著退化	1.47
$-0.01 \leq K < 0.005$	>0.5	持续性轻度退化	6.44
$-0.05 \leq K < 0.05$	>0.5	持续性稳定不变	9.84
$0.05 \leq K < 0.01$	>0.5	持续性轻度改善	19.63
$K > 0.01$	>0.5	持续性显著改善	5.79
$-\infty \leq K < \infty$	≤ 0.5	不确定	56.82

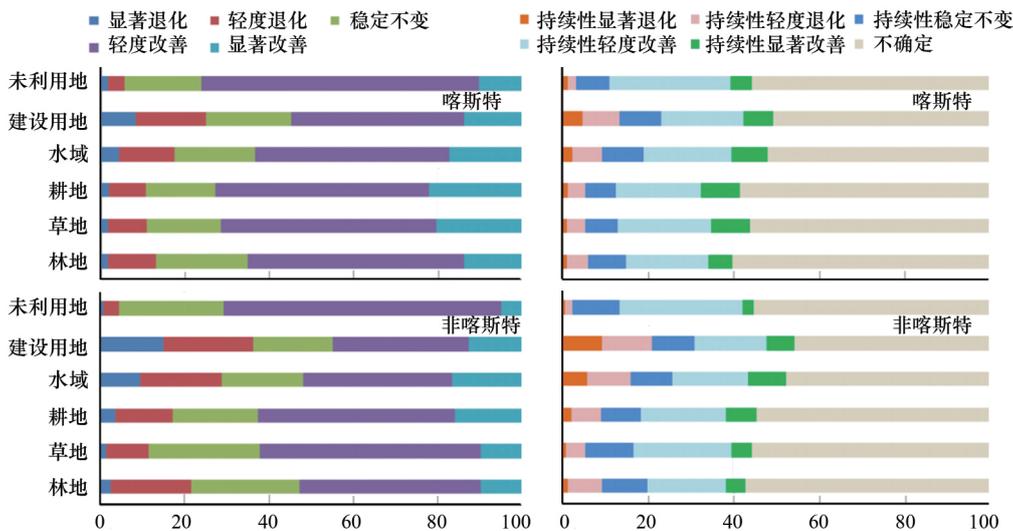


图 5 统计各种土地覆被类型的 NDVI 变化趋势及变化特征
Fig.5 Statistics of NDVI trend and variation character by different land use types

采用地理探测器分析因子对 NDVI 空间分布的驱动力,整体而言,众多因子中,海拔对 NDVI 的空间分布影响力最大,其次是气温、降水、夜间灯光指数、日照、坡度、坡向。相比非喀斯特区域而言:喀斯特区域 NDVI 空间分布更易受到气温、降水、日照、夜间灯光指数影响(图 7)。从土地覆被类型来:林地的 NDVI 空间分布受海拔、气温、坡度影响大;草地和未利用地的 NDVI 空间分布受海拔和气温影响较大;耕地的 NDVI 空间分布受海拔、气温和降水影响较大;建设用地的 NDVI 空间分布受夜间灯光指数影响最大;水域 NDVI 空间分布受此类因子影响都不明显(表 4)。总而言之:海拔、气温、降水是研究区 NDVI 的主要驱动因子;相比而言,喀斯特区域 NDVI 空间分布更易受气候因子影响;非喀斯特区域 NDVI 空间分布更易受地形因子影响;建设用地 NDVI 空间分布主要受人类活动强度影响。

2.4 植被覆盖动态变化的驱动因素分析

基于研究区每年植被 NDVI 数据,分别计算其与当年平均气温、降雨、日照的相关系数。经检验,研究区 49.37%的植被 NDVI 与气温的相关系数通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验;主要分布于湖南、贵州、四川的中纬度地区。37.99%的植被 NDVI 与降水量的相关系数通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验;以四川盆地区为主。55.18%的植被 NDVI 与日照的相关系数通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验;主要分布在研究区东部(图 8)。在研究时段内,从年尺度来看:植被与日照的相关性最高,其次是温度、降雨。从土地覆被类型来看:草地和未利用地的植被变化植被受气温影响较大,分别有 51.18%、67.89%的植被与气温显著相关。耕地与降雨的相关性明显,46.21%的植被与降雨量显著相关。有林地与日照相关性明显,62.82%的植被与日照显著相关(表 5)。

从地质背景来看:喀斯特区域植被变化和温度、降雨、日照的相关性更为显著,分别有 54.38%、40.23%、

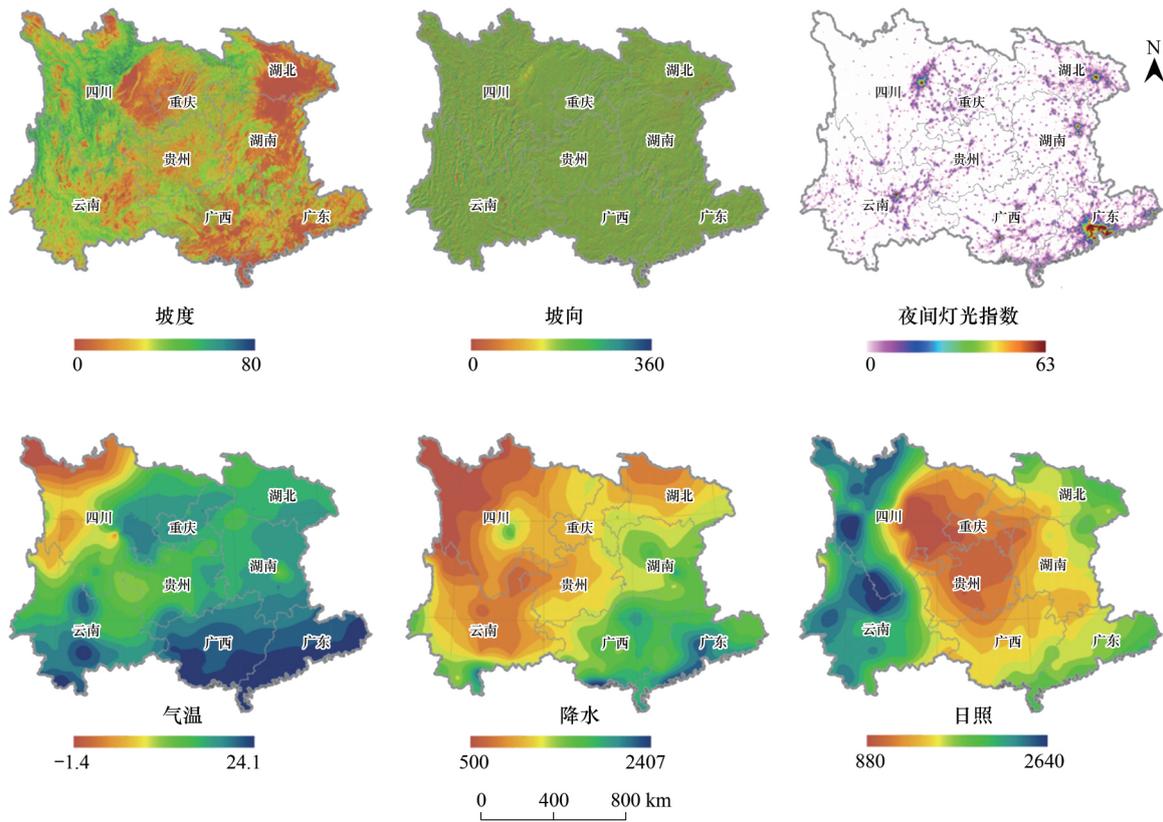


图 6 研究区地区坡度空间分布图 坡向空间分布图 夜间灯光指数空间分布图 温度空间分布图 降水量空间分布图 日照空间分布图

Fig.6 Spatial distribution of slope , aspect , night light , temperature , precipitation , sunshine in South of China

61.83%的植被 NDVI 的相关系数通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。NDVI 的变化受到气候综合变化的影响,但往往空间上气温,降水,日照时数的变化趋势不一致。本文将气温,降水,日照时数与年均 NDVI 变化的相关性基于最大值合成法,以分析年均 NDVI 变化与气候变化的显著性水平分析。如图 8 所示,在整个研究区内,NDVI 与气候变化正相关的面积占整个研究区的 95.74%,其中达显著正相关($P<0.05$)的主要分布在东南部,包含四川东南部,湖南南部,广西,广东,重庆,贵州大部分地区,约占 56.61%。

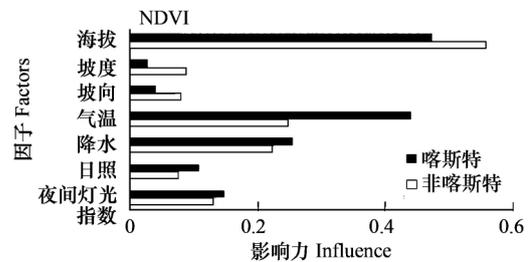


图 7 各因子对 NDVI 空间分布的影响力

Fig.7 Influence of factors on the spatial distribution of NDVI

表 4 影响因子对 NDVI 空间分布的影响力

Table 4 The influence of factors on the spatial distribution of NDVI

	土地覆被类型 Land use types	海拔 DEM	坡度 Slope	坡向 Aspect	气温 Temperature	降水 Precipitation	日照 Sunshine	夜间灯光指数 Night light
喀斯特	林地	0.2124	0.2183	0.1036	0.1428	0.0684	0.1257	0.0181
Karst	草地	0.5039	0.1064	0.0342	0.3446	0.1822	0.1237	0.0201
	耕地	0.6434	0.1263	0.0478	0.4672	0.4061	0.2952	0.0626
	水域	0.1808	0.2097	0.1215	0.2039	0.1516	0.1860	0.2034
	建设用地	0.2487	0.2120	0.0554	0.2224	0.1431	0.1534	0.5533
	未利用地	0.7248	0.0744	0.1092	0.6731	0.5075	0.4945	0.1656

续表

	土地覆被类型 Land use types	海拔 DEM	坡度 Slope	坡向 Aspect	气温 Temperature	降水 Precipitation	日照 Sunshine	夜间灯光指数 Night light
非喀斯特 No-karst	林地	0.1835	0.1764	0.0727	0.2484	0.1260	0.1438	0.1396
	草地	0.6736	0.1889	0.1646	0.4454	0.3345	0.1904	0.2389
	耕地	0.6434	0.1263	0.0478	0.4672	0.4061	0.2952	0.0626
	水域	0.1194	0.1722	0.1625	0.0740	0.1385	0.1149	0.0913
	建设用地	0.1451	0.0198	0.1033	0.1232	0.3601	0.3177	0.5692
	未利用地	0.3934	0.2244	0.1158	0.2351	0.0761	0.1392	0.1177

表 5 统计不同土地覆被类型下各因子与 NDVI 显著相关的面积比

Table 5 Area ratios of significantly related between NDVI change and factors under different land use types

土地覆被类型 Land use types	面积比例 Area ratio/%	气温 Temperature	降水 Precipitation	日照 Sunshine
喀斯特 Karst		54.38	40.23	61.38
林地 Forest land	55.77	54.09	37.06	64.03
草地 Grassland	18.81	51.01	42.95	54.32
耕地 Cultivated field	23.48	56.47	44.32	59.87
水域 Water	0.85	52.01	41.42	54.68
建设用地 Construction land	0.69	50.44	32.58	55.43
未利用地 Unutilized land	0.39	70.19	17.98	54.39
非喀斯特 No-karst		47.47	37.14	52.83
林地 Forest land	50.03	49.79	31.52	62.36
草地 Grassland	17.56	51.24	39.80	45.07
耕地 Cultivated field	26.66	41.16	46.93	42.02
水域 Water	2.42	38.25	31.50	40.59
建设用地 Construction land	1.98	35.07	34.02	43.87
未利用地 Unutilized land	1.36	66.64	27.98	42.83

本文相关性水平通过了相关系数 $\alpha=0.05$ 的显著性检验 ($P<0.05$)

3 讨论

3.1 NDVI 空间分布分析

研究区植被在空间分布上有着较大差异,在以往的研究中普遍提出地形(海拔、坡度、坡向等)、气象(温度、降雨、日照等)、人类活动等因子的影响^[43-44];本文的认识与以往研究结果相近。海拔和温度是控制研究区 NDVI 空间分布的最主要因素。研究区整体上植被覆盖呈现东高西低、南高北低的空间分布,主要原因是:研究区东西地形差异大,海拔由东向西增高,地貌东南以平原丘陵为主,西北以中高山居多;纬度和海拔综合的原因导致东南高、西北低的温度差异^[45-47]。从地质背景来看,喀斯特区域林地和耕地的 NDVI 值除低于非喀斯特区域;草地、水域、建设用地及未利用地的 NDVI 值高于非喀斯特区域。主要原因在于:喀斯特地区山地面积占比大,土壤稀薄,保水差,林地中以低矮树木居多,植被丰茂程度低;耕地以坡地居多,旱地为主,植被覆盖度低;同时,林地和耕地中存在石漠化现象^[48-49];非喀斯特区域的草地以研究区西北部的高山草地为主,NDVI 值较低;在水域、建设用地、未利用地三类土地覆被类型中,喀斯特和非喀斯特间的 NDVI 无明显差异。值得关注的是建设用地 NDVI 空间分布受夜间灯光指数差异影响尤为明显;主要原因是建设用和近周边区域人类活动强度差异较为明显^[50]。非喀斯特区域 NDVI 在空间分布上受地形因子影响较大;喀斯特区域 NDVI 在空间分布上受地形气候因子和人类活动因子影响较大。原因在于:非喀斯特区域,土壤厚度肥力,以及下垫面保水条件优于喀斯特区域^[45,49],因此,地形成为非喀斯特区域植被生长的关键因素,气候和人类活动成为喀斯特区域植被生长的主导因素。在地质背景相对恶劣的喀斯特区域,应适当加大生态保护与修复的

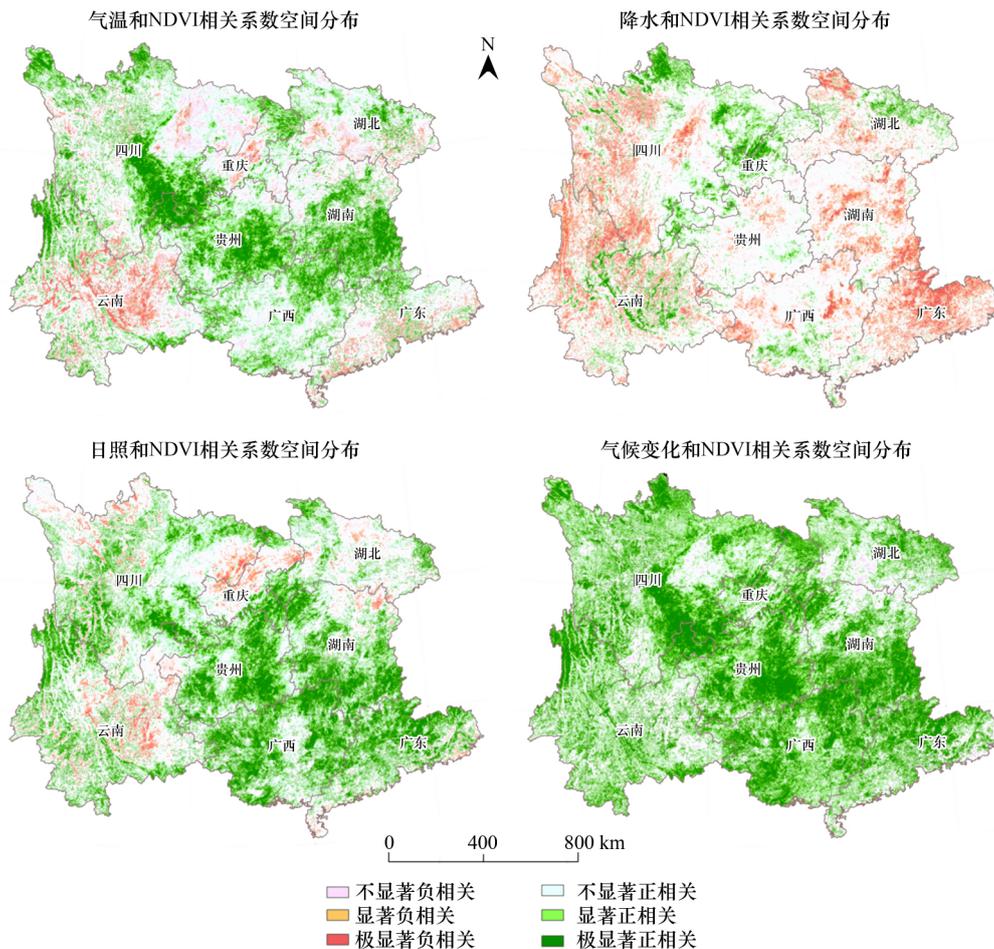


图 8 研究区气温和 NDVI 相关系数空间分布图; 降水与 NDVI 的相关系数空间分布图; 日照与 NDVI 的相关系数空间分布图; 气候变化与 NDVI 的相关系数空间分布图

Fig.8 Spatial distribution of the correlation coefficients of temperature and NDVI; the correlation coefficients of precipitation and NDVI; the correlation coefficients of sunshine and NDVI; the correlation coefficients of climate change and NDVI in South of China

力度。

3.2 NDVI 变化归因分析

2000—2016 年, 研究区植被整体呈增长趋势, 植被处在恢复阶段, 本文的认识与以往的结论是一致的^[19, 20, 43]。气候变化和人类活动是影响植被变化的主要原因^[20], 然而在研究时间内, 降雨, 气温, 日照都没有明显的上升趋势。因此, 研究区植被的恢复主要归因于人类活动: 随着经济的迅速发展, 中国大部分农民减少对土地的依赖, 降低了人类不合理活动对生态环境的影响; 加上政府倡导退耕还林、石漠化综合治理等生态环境治理工程, 生态环境得到了保护, 这些项目的实施导致贵州西部, 四川东南部, 云南东北部的林地, 草地, 耕地的大面积显著改善。值得关注的是: (1) 经济的发展, 加剧了城市的扩张; 导致以建设用地为主, 有 2.71% 土地的植被覆盖显著退化的趋势。(2) 17 年间, 喀斯特区域 NDVI 的增长率 0.0036/a 高于非喀斯特区域的 0.0025/a。是因为喀斯特生态环境较为恶劣, 政府在喀斯特区域实施更多的生态保护和治理政策^[19]。(3) 研究区在 2005 和 2012 年间的 NDVI 值极低, 与以往研究一致, 这是受气候变化影响^[29], 研究区在 2004, 2005, 2011 和 2012 年的年均降雨量分别为 1105, 1120, 976, 1044mm (低于研究区多年平均降雨 1164mm), 其中, 2011 年我国平均年降水量创 60 年来新低; 2005 和 2012 日照分别为 1565, 1554h (低于研究区多年平均日照 1670h); 2012 的气温是 15.9℃, 接近与研究时间内的最低值。这些是导致 2005 年, 2012 年 NDVI 值极低的关键原因。

3.3 局限性与展望

本研究由于 MODIS 数据的局限性,在计算 2000 年的年均 NDVI 值时,采用 2001 年的 1 月份、2 月份代替计算,对 2000 年的 NDVI 值有一定影响。大区域尺度上,不同空间位置植被动态对气候变化的响应存在差异的滞后性;由于数据获取的难度,本文基于年际尺度,以同年计算气温、降雨、日照与 NDVI 的相关性,存在一定的局限性。将来的研究中有望探明植被动态对气候因子的空间滞后差异。

4 结论

本研究基于 MODIS-NDVI 数据,利用 NDVI 时间序列,采用一元线性回归方程斜率和 Hurst 指数,地理探测器,相关分析;探讨了研究区植被的时空演化特征及驱动因素。得出主要结论如下:

(1) 从 2000—2016 年间,研究区植被整体呈增长趋势;年平均 NDVI 的增长率是 0.0028/a;喀斯特区域增长率略高于非喀斯特区域。植被覆盖的空间上呈现东高西低分布格局;林地的 NDVI 值最高,耕地次之,依次草地、居民用地、水域、未利用地最低;在林地和耕地中,非喀斯特区域的 NDVI 值比喀斯特高,其余的土地覆盖类型中都比喀斯特区域低;

(2) 研究区的 NDVI 呈现整体改善趋势;改善的地区植被覆盖率占 60.19%,而退化地区只占 17.06%;草地、耕地改善明显,退化主要在水域和建设用地;Hurst 指数显示在研究区中 NDVI 变化趋势呈持续性的约 43.18%,持续性改善的 NDVI(25.42%) 大于持续性退化(9.71%);相比非喀斯特区域,喀斯特区域改善及持续性改善情况更佳;

(3) 整体而言,海拔对 NDVI 的空间分布影响力最大,温度次之,依次为降雨、夜间灯光指数;相比而言,非喀斯特区域 NDVI 空间分布更易受地形因子影响;喀斯特区域 NDVI 空间分布更易受气候差异及人类活动影响;

(4) 研究区分别有 49%、45%、61% 的植被 NDVI 与气温、降雨、日照的相关系数通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验;相比而言,喀斯特区域植被生长更易受气候及人类活动变化影响。

参考文献(References):

- [1] Arora V. Modeling vegetation as a dynamic component in soil-vegetation-atmosphere transfer schemes and hydrological models. *Reviews of Geophysics*, 2002, 40(2): 3-13-26.
- [2] Suzuki R, Masuda K, Dye D G. Interannual covariability between actual evapotranspiration and PAL and GIMMS NDVIs of northern Asia. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106(3): 387-398.
- [3] Meyer W B, Turner II B L. Human population growth and global Land-Use/Cover Change. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1992, 23: 39-61.
- [4] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, Asrar G, Nemani R R. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 1997, 386(6626): 698-702.
- [5] Aguilar C, Zinnert J C, Polo M J, Young D R. NDVI as an indicator for changes in water availability to woody vegetation. *Ecological Indicators*, 2012, 23: 290-300.
- [6] Pouliot D, Latifovic R, Olthof I. Trends in vegetation NDVI from 1 km AVHRR data over Canada for the period 1985-2006. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(1): 149-168.
- [7] Pettorelli N, Vik J O, Myserud A, Gaillard J M, Tucker C J, Stenseth N C. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, 20(9): 503-510.
- [8] Feng X M, Fu B J, Yang X J, Lü Y H. Remote sensing of ecosystem services: an opportunity for spatially explicit assessment. *Chinese Geographical Science*, 2010, 20(6): 522-535.
- [9] Cabello J, Fernández N, Alcaraz-Segura D, Oyonarte C, Piñeiro G, Altesor A, Delibes J, Paruelo J M. The ecosystem functioning dimension in conservation: insights from remote sensing. *Biodiversity and Conservation*, 2012, 21(13): 3287-3305.
- [10] Xie Y C, Sha Z Y, Yu M. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 1(1): 9-23.
- [11] 刘宪锋,任志远,林志慧,刘焱序,张东海. 2000-2011 年三江源区植被覆盖时空变化特征. *地理学报*, 2013, 68(7): 897-908.

- [12] Levin N, Shmida A, Levanoni O, Tamari H, Kark S. Predicting mountain plant richness and rarity from space using satellite-derived vegetation indices. *Diversity and Distributions*, 2007, 13(6): 692-703.
- [13] Turvey C G, Mclaurin M K. Applicability of the normalized difference vegetation index (NDVI) in index-based crop insurance design. *Weather, Climate, and Society*, 2012, 4(4): 271-284.
- [14] Rundquist B C. The influence of canopy green vegetation fraction on spectral measurements over native tallgrass prairie. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(1): 129-135.
- [15] Van Leeuwen W J D, Orr B J, Marsh S E, Herrmann S M. Multi-sensor NDVI data continuity: uncertainties and implications for vegetation monitoring applications. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100(1): 67-81.
- [16] Ivits E, Cherlet M, Sommer S, Mehl W. Addressing the complexity in non-linear evolution of vegetation phenological change with time-series of remote sensing images. *Ecological Indicators*, 2013, 26: 49-60.
- [17] Tucker C J, Slayback D A, Pinzon J E, Los S O, Myneni R B, Taylor M G. Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999. *International Journal of Biometeorology*, 2001, 45(4): 184-190.
- [18] 方精云, 朴世龙, 贺金生, 马文红. 近 20 年来中国植被活动在增强. *中国科学(C 辑)*, 2003, 33(6): 554-565.
- [19] Lü Y H, Zhang L W, Feng X M, Zeng Y, Fu B J, Yao X L, Li J R, Wu B F. Recent ecological transitions in China: greening, browning, and influential factors. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 8732.
- [20] Tong X W, Wang K L, Brandt M, Yue Y M, Liao C J, Fensholt R. Assessing future vegetation trends and restoration prospects in the karst regions of Southwest China. *Remote Sensing*, 2016, 8(5): 357.
- [21] 马士彬, 安裕伦, 杨广斌, 张勇荣. 喀斯特地区不同植被类型 NDVI 变化及驱动因素分析——以贵州为例. *生态环境学报*, 2016, 25(7): 1106-1114.
- [22] Tucker C J, Vanpraet C L, Sharman M J, Van Ittersum G. Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel: 1980-1984. *Remote Sensing of Environment*, 1985, 17(3): 233-249.
- [23] Sedano F, Kempeneers P, Hurtt G. A Kalman filter-based method to generate continuous time series of medium-resolution NDVI images. *Remote Sensing*, 2014, 6(12): 12381-12408.
- [24] 马士彬, 安裕伦, 杨广斌. 基于 GIS 的喀斯特区域不同岩性基底植被 NDVI 变化分析. *水土保持研究*, 2017, 24(2): 202-206, 212-212.
- [25] Florinsky I V, Kuryakova G A. Influence of topography on some vegetation cover properties. *CATENA*, 1996, 27(2): 123-141.
- [26] Ndayisaba F, Guo H, Bao A M, Guo H, Karamage F, Kayiranga A. Understanding the spatial temporal vegetation dynamics in Rwanda. *Remote Sensing*, 2016, 8(2): 129.
- [27] Chen X Q, Pan W F. Relationships among phenological growing season, time-integrated normalized difference vegetation index and climate forcing in the temperate region of eastern China. *International Journal of Climatology*, 2002, 22(14): 1781-1792.
- [28] Jiang L L, Jiapaer G, Bao A M, Guo H, Ndayisaba F. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia. *Science of the Total Environment*, 2017, 599-600: 967-980.
- [29] Tian Y C, Bai X Y, Wang S J, Qin L Y, Li Y. Spatial-temporal changes of vegetation cover in Guizhou Province, southern China. *Chinese Geographical Science*, 2017, 27(1): 25-38.
- [30] Martínez B, Gilbert M A. Vegetation dynamics from NDVI time series analysis using the wavelet transform. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(9): 1823-1842.
- [31] 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 李双双. 2000-2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因. *地理学报*, 2015, 70(5): 705-716.
- [32] 袁道先. 岩溶与全球变化研究. *地球科学进展*, 1995, 10(5): 471-474.
- [33] 王世杰, 张信宝, 白晓永. 中国南方喀斯特地貌分区纲要. *山地学报*, 2015, 33(6): 641-648.
- [34] Vermote E F, El Saleous N Z, Justice C O. Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: first results. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1/2): 97-111.
- [35] 董祚继. 中国现代土地利用规划研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007.
- [36] 成方妍, 刘世梁, 尹艺洁, 吕一河, 安南南, 刘昕明. 基于 MODIS NDVI 的广西沿海植被动态及其主要驱动因素. *生态学报*, 2017, 37(3): 788-797.
- [37] 刘世梁, 赵海迪, 董世魁, 苏旭坤, 刘琦, 邓丽, 张翔. 基于 SPOT NDVI 的阿尔金山自然保护区植被动态变化研究. *干旱区研究*, 2014, 31(5): 832-837.
- [38] Hurst H E. Long-term storage capacity of reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1951, 116(12): 770-799.
- [39] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 刘颖慧, 王文杰, 陶亮亮, 郑华, 刘孝富. 2000-2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化. *生态学报*, 2013, 33(24): 7798-7806.
- [40] Wang J F, Li X H, Christakos G, Liao Y L, Zhang T, Gu X, Zheng X Y. Geographical detectors-based health risk assessment and its application

- in the neural tube defects study of the Heshun Region ,China. *International Journal of Geographical Information Science* ,2010 ,24(1) : 107-127.
- [41] Evans J , Geerken R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation. *Journal of Arid Environments* , 2004 , 57(4) : 535-554.
- [42] Yuan D X. Rock desertification in the subtropical Karst of South China. *Zeitschrift Fur Geomorphologie* ,1997 ,108: 81-90.
- [43] Jiang WG , Yuan L H , Wang W J , Cao R , Zhang Y F , Shen W M. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin. *Ecological Indicators* ,2015 ,51: 117-126.
- [44] 孙红雨,王长耀,牛铮,布和敖斯尔,李兵. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系——基于 NOAA 时间序列数据. *遥感学报* ,1998 ,2(3) : 204-210.
- [45] 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 ,23(6) : 657-666.
- [46] 吕洋,董国涛,杨胜天,周秋文,蔡明勇. 雅鲁藏布江流域 NDVI 时空变化及其与降水和高程的关系. *资源科学* ,2014 ,36(3) : 603-611.
- [47] 范娜,谢高地,张昌顺,陈龙,李文华,成升魁. 2001 年至 2010 年澜沧江流域植被覆盖动态变化分析. *资源科学* ,2012 ,34(7) : 1222-1231.
- [48] 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.
- [49] 袁道先. 我国西南岩溶石山的环境地质问题. *大自然探索* ,1996 ,15(4) : 21-23.
- [50] 韦振锋,王德光,张翀,刘宪锋,张晗. 1999-2010 年中国西北地区植被覆盖对气候变化和人类活动的响应. *中国沙漠* ,2014 ,34(6) : 1665-1670.