

DOI: 10.5846/stxb201807251593

吕妍, 张黎, 闫慧敏, 任小丽, 王军邦, 牛忠恩, 顾峰雪, 何洪林. 中国西南喀斯特地区植被变化时空特征及成因分析. 生态学报, 2018, 38(24):

Lü Y, Zhang L, Yan H M, Ren X L, Wang J B, Niu Z G, Gu F X, He H L. Spatial and temporal patterns of changing vegetation and the influence of environmental factors in the karst region of Southwest China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(24):

中国西南喀斯特地区植被变化时空特征及成因分析

吕 妍^{1,3}, 张 黎^{1,4,*}, 闫慧敏^{2,4}, 任小丽¹, 王军邦¹, 牛忠恩^{1,3}, 顾峰雪⁵, 何洪林^{1,4}

1 中国科学院地理科学与资源研究所 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院地理科学与资源研究所 资源利用与环境修复重点实验室, 北京 100101

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049

5 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所 农业部旱作节水农业重点实验室, 北京 100081

摘要: 2000 年以来, 国家在中国西南喀斯特地区开展一系列生态治理工程, 该地区退化生态系统得到一定程度的恢复, 而 2008 年开展石漠化综合治理工程以来该地区的植被覆盖和生产力如何变化尚不清楚。本研究利用遥感增强型植被指数 (EVI) 和总初级生产力 (GPP) 数据, 研究 2000—2015 年西南喀斯特地区植被 EVI 年均值和 GPP 年总量的时空变化特征, 重点探讨 2008 年以来石漠化综合治理工程、气候变化等因素对植被覆盖及生长的影响, 进而评估石漠化综合治理工程的成效。结果表明, 2000—2015 年西南喀斯特地区植被 EVI 总体显著增加, 其中 2008—2015 年植被 EVI 均值和变化率分别比 2000—2007 年高 6.9% 和 85.7%, EVI 显著增加的区域占西南喀斯特地区的 13.4%; 该区域 GPP 年总量亦呈显著增加趋势 ($20.58 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。2008—2015 年气温和降水对植被 EVI 变化趋势的贡献仅占 28.3%, 退耕还林还草等生态恢复措施、大气 CO_2 浓度、大气氮沉降的增加可能是该区域植被覆盖显著增加的主要贡献因子。在 100 个首批石漠化综合治理试点县中, 大部分试点县植被 EVI 的变化趋势受非气候因子的影响, 其中治理面积大的县受非气候因子的影响显著高于治理面积小的县, 表明石漠化综合治理工程的实施有效地促进了试点县植被覆盖的增加。

关键词: 喀斯特; 植被指数; 生态系统生产力; 石漠化治理

Spatial and temporal patterns of changing vegetation and the influence of environmental factors in the karst region of Southwest China

LÜ Yan^{1,3}, ZHANG Li^{1,4,*}, YAN Huimin^{2,4}, REN Xiaoli¹, WANG Junbang¹, NIU Zhongen^{1,3}, GU Fengxue⁵, HE Honglin^{1,4}

1 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Key Laboratory of Resource Utilization and Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

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

4 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

5 Key Laboratory of Dryland Agriculture, Ministry of Agriculture, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: Degraded ecosystems in the karst region of Southwest China have been restored to some extent through a series of

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41571130043); 国家重大科学研究计划 (2015CB954102); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0500204); 中国科学院科技服务网络计划项目 (KFJ-SW-STS-167)

收稿日期: 2018-07-25; 修订日期: 2018-12-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: li.zhang@igsrr.ac.cn

ecological conservation projects that started in 2000. However, changes in vegetation during the ongoing rocky desertification control projects occurring in this region since 2008 are not well understood. In this study, we used an enhanced vegetation index (EVI) and gross primary productivity (GPP) derived from remote sensing data to investigate the temporal and spatial patterns of EVI and GPP during 2000—2015. Particularly, we focus on changes since 2008 and the responses of vegetation trends to multiple environmental factors in this region. Results show that the annual EVI increased drastically between 2000 and 2015. In particular, the mean and increasing trend of EVI in 2008—2015 was larger than in 2000—2007 by 6.9% and 85.7%, respectively. Ecosystems with significant increase in EVI accounted for 13.4% of the study area in 2008—2015, where annual GPP also increased remarkably with an average growth rate of $20.58 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. The contributions of temperature and precipitation to increase in EVI were 28.3%. Land cover changes due to the rocky desertification control projects and increase in atmospheric carbon dioxide and atmospheric nitrogen deposition could be the major factors causing increase in EVI. Furthermore, when we divided the 100 pilot counties in the first stage of the rocky desertification control projects into four groups according to their total area of conservation, the EVI trend attributed to non-climatic factors differed significantly among the four groups. Counties with higher conservation efforts had a larger EVI attributed to non-climatic factors, which indicated that the rocky desertification control projects play an important role in increasing vegetation cover.

Key Words: Karst ecosystem; vegetation index; ecosystem productivity; Rocky desertification control projects

中国西南喀斯特地区是世界三大岩溶区之一,岩溶面积约为 51.36 万 km^2 ,占我国国土面积的 5.35% ^[1]。受地球内动力、强烈的地质运动、高温多雨的气候等因素的影响,石漠化成为这一地区最为严重的环境问题,威胁着西南喀斯特地区的生态安全和社会经济发展^[2,3]。20 世纪 80 年代国家开始治理西南喀斯特地区的石漠化,实施了包括“长防”和“长治”工程、“珠治”试点工程在内的一系列生态工程^[4],石漠化问题受到越来越多的关注。随着 2000 年以来退耕还林还草、天然林保护等生态治理工程的实施,喀斯特退化生态系统得到一定程度的恢复。特别是自 2008 年国务院批复《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲》以来,在西南喀斯特地区设立首批 100 个石漠化治理试点县开展封山育林育草、人工造林种草、坡改梯、生态移民等石漠化综合治理工程,之后又陆续在 351 个石漠化县开展生态恢复工作。截止到 2015 年我国西南喀斯特地区石漠化总面积降至 9.2 万 km^2 ,演变趋势由加剧变化为逐渐减缓^[5,6]。尽管这些生态工程的实施在一定程度上遏制了生态系统的退化,并促使该区域生态状况逐渐向良性发展,但受暴雨和干旱等极端气候事件以及人类对土地的过度开发利用等因素的影响,该区域的水土流失问题依然严峻,进而引起植被覆盖和生产力的降低^[7]。在气候变化和人类活动综合影响的背景下,研究中国西南喀斯特地区植被覆盖及生产力的动态变化及其驱动因子具有重要科学意义,同时也是评估生态工程成效的重要基础。

植被覆盖和生态系统生产力是定量评估生态系统植被状况的两个重要指标。归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 与增强型植被指数 (Enhanced Vegetation Index, EVI) 已被广泛用于指示植被覆盖状况^[8]。生态系统总初级生产力 (Gross Primary Productivity, GPP) 与生态系统净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP) 均是地-气 CO_2 交换过程中的重要分量,分别为绿色植物通过光合作用从大气中固定 CO_2 形成光合产物的总量及减去植物自养呼吸后的有机质总量^[9,10]。已有研究表明,与 1981—2011 年中国西南喀斯特地区 NDVI 和 NPP 不显著的增加趋势相比^[11],2000 以来在生态工程实施的背景下中国西南喀斯特地区植被指数、生产力和生物量明显增加^[12-16],特别是广西西北、贵州中部和云南东南部地区。其中,广西西北部喀斯特区域 2000—2010 年 NPP 和净生态系统生产力 (Net Ecosystem Productivity, NEP) 的增长率分别为 $13.20 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $9.00 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[17];2000—2005 年该地区植被碳储量和碳密度亦呈增加趋势,年增长率分别为 $4.2 \times 10^5 \text{ t a}^{-1}$ 和 $0.66 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[18]。2002—2008 年贵州毕节喀斯特区域 NDVI 年增长率处在 $0 \sim 0.04 \text{ a}^{-1}$ 之间^[19]。2001—2010 年云南东南部喀斯特区域 NDVI 呈上升趋势,增加速率为 0.003 a^{-1} ^[20]。然而,

关于 2008 年开展石漠化综合治理工程以来中国西南喀斯特地区的植被覆盖和生产力如何变化尚不清楚。

本研究采用 500 m 分辨率的遥感产品和遥感光能利用率模型,分析 2000—2015 年中国西南喀斯特地区植被覆盖及生长状况的时空变化特征,重点探讨 2008 年以来石漠化综合工程、气候变化等环境因素对植被覆盖及生长的影响。考虑到 EVI 比 NDVI 对高植被覆盖地区更敏感,以及 GPP 决定了进入陆地生态系统初始物质和能量^[8-10],本文选用 EVI 年均值和 GPP 年总量这 2 个因子来研究中国西南喀斯特地区植被覆盖和生长的动态变化。本研究将增进人们对中国西南喀斯特地区如何响应气候变化和人类活动的认识,并为定量评估喀斯特区域已有石漠化综合治理工程的实施效益提供依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

中国西南喀斯特地区(96°50′—117°18′E, 20°06′—34°12′N)主要包括贵州、云南、四川、重庆、湖北、湖南、广西壮族自治区、广东八省,岩溶面积占八省总面积的 26.51%^[21]。地势西高东低,呈阶梯状分布,地形破碎,地貌类型多样,具有高度的景观异质性,东西两侧海拔高度差异较大^[22]。大部分地区属亚热带季风气候,年均温 15℃ 以上,年均降水量大于 1100 mm,雨热同期^[1]。土壤类型有黄棕壤、红壤、石灰土等,土壤松散易侵蚀,富钙、偏碱性。喀斯特生态系统的基岩主要由纯碳酸盐岩(25%)和不纯碳酸盐岩(23%)组成,而其余地区的基岩则由碎屑岩组成^[23]。植被类型主要包括混交林(33.8%)、草原(31.1%)农田(21.6%)、常绿阔叶林(9.8%)(图 1)。在湿润、半湿润气候条件和喀斯特地貌极其发育的自然背景下,受人为活动干扰,石漠化面积逐年增加,2005 年达到 12.96 万 km²,占西南喀斯特地区的 6.8%,面临着非常严重的石漠化问题^[1]。

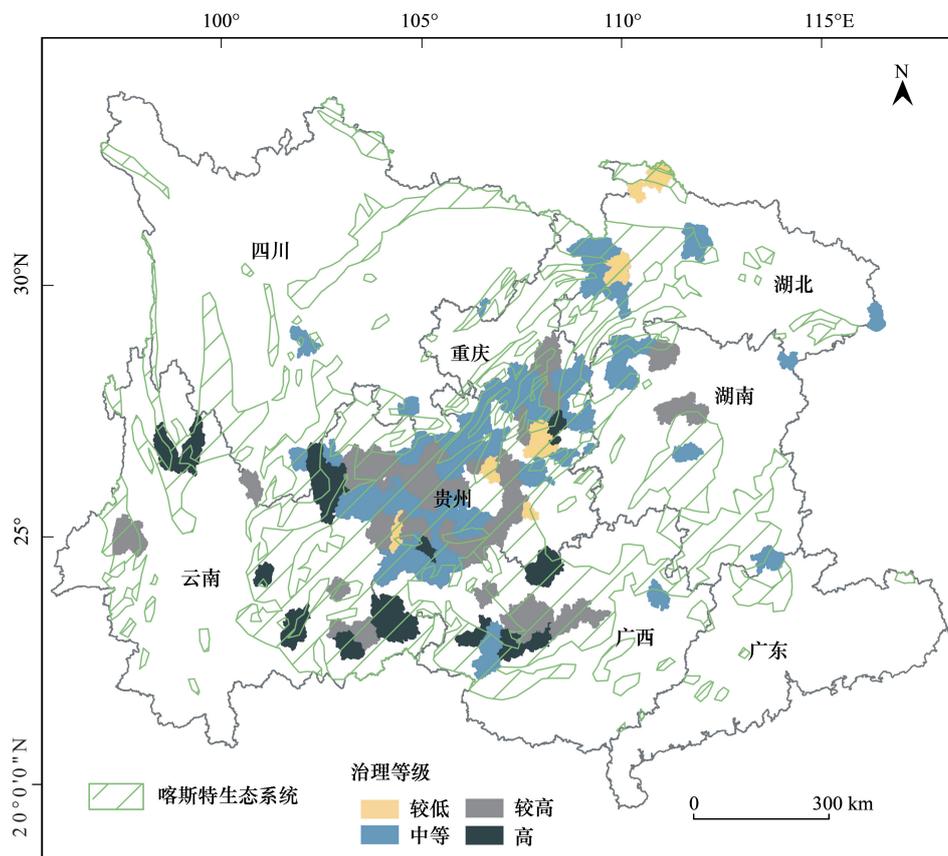


图 1 研究区域

Fig.1 The study region

1.2 VPM 模型

VPM 模型 (Vegetation Photosynthesis Model, VPM) 是基于光能利用率原理的遥感生产力模型^[24,25]。该模型将叶片和冠层划分为叶绿素部分 (Chlorophyll) 和非光合部分 (Non-photosynthetic Vegetation, NPV), 将冠层吸收光合有效辐射的比例分为叶绿素吸收的部分 (FPAR_{chl}) 与非光合植被吸收的部分 (FPAR_{NPV}), 光合作用仅发生在叶绿素部分^[24,25]。GPP 的计算方程表示为:

$$GPP = \varepsilon_g \times FPAR_{chl} \times PAR \quad (1)$$

$$\varepsilon_g = \varepsilon_0 \times T_{scalar} \times W_{scalar} \times P_{scalar} \quad (2)$$

式中, PAR (Photo Synthetically Action Radiation) 为光合有效辐射; FPAR_{chl} 指的是植被光合部分吸收光合有效辐射的比例; ε_g 为光能利用率; ε_0 为最大光能利用率; T_{scalar} 、 W_{scalar} 和 P_{scalar} 分别为温度、水分和叶物候对 ε_0 的调节系数。其中, FPAR_{chl} 被近似用 EVI 的线性函数来表达:

$$FPAR_{chl} = a \times EVI \quad (3)$$

式中, a 为经验系数, 取值为 1^[24,25]。 T_{scalar} 代表温度对光合的影响。根据陆地生态系统模型 (Terrestrial Ecosystem Model, TEM) 的原理^[26], 将其表示为:

$$T_{scalar} = \frac{(T - T_{min})(T - T_{max})}{(T - T_{min})(T - T_{max}) - (T - T_{opt})^2} \quad (4)$$

式中, T_{min} 、 T_{max} 和 T_{opt} 分别指的是植被进行光合作用需要的最低、最高和最适温度 (°C)^[27-29]。当空气温度低于 T_{min} 时, T_{scalar} 就设为 0。

W_{scalar} 代表水分对光合的影响。VPM 中 W_{scalar} 通过水分敏感的陆表水分指数 (Land Surface Water Index, LSWI) 计算得到, 公式表示为:

$$W_{scalar} = \frac{1 + LSWI}{1 + LSWI_{max}} \quad (5)$$

式中, LSWI_{max} 指的是生长季单个像元内植被的最大 LSWI。

P_{scalar} 代表叶物候对冠层尺度光合的影响, 取决于叶龄的长短。对于叶龄为 1 年的植被, 将其在 1 年内经历的从出芽到凋落过程分成两个阶段分别计算, 其中出芽到完全展叶的阶段表示为:

$$P_{scalar} = \frac{1 + LSWI}{2} \quad (6)$$

展叶后的阶段, P_{scalar} 为 1。对于叶片可以保持几个生长季、冠层由不同叶龄的叶片组成、生长季中不断有新叶长出的植被, P_{scalar} 均设为 1。

EVI 和 LSWI 由 MODIS 产品中的地表反射率 (空间分辨率 500 m, 时间步长 8 d) 计算得到, 公式为^[30,31]

$$EVI = \frac{2.5 \times (\rho_{nir} - \rho_{red})}{(\rho_{nir} + (C1 \times \rho_{red} - C2 \times \rho_{blue}) + L)} \quad (7)$$

$$LSWI = \frac{(\rho_{nir} - \rho_{swir})}{(\rho_{nir} + \rho_{swir})} \quad (8)$$

式中, $C1$ 为大气修正红光校正参数, 值为 6.0; $C2$ 为大气修正蓝光校正参数, 值为 7.5; L 为土壤调节参数, 值为 1.0^[30]。 ρ_{nir} 、 ρ_{red} 、 ρ_{blue} 及 ρ_{swir} 分别为近红外、红波、蓝波以及短波光的地表反射率。

VPM 模型已被广泛应用于不同区域的森林 (中国长白山森林^[24]、美国 Howland 森林^[25]、美国 Harvard 森林^[32])、草地 (中国内蒙古草地^[33]、农田 (中国禹城农田^[34]、美国 Twitchell Island 农田、日本 Mase 农田、韩国 Gimje 和 Haenam 农田^[35]) 等生态系统的 GPP 评估, 观测值和模拟值的决定系数在 0.64 以上。在中国西南喀斯特地区, VPM 模拟的年 GPP 与通量塔测定的草地 GPP 动态有很好的 consistency ($R^2 = 0.77$)^[36]。

1.3 研究数据

研究数据包括 VPM 模型输入数据和辅助数据。VPM 模型需要的输入数据包括 2000—2015 年空间分辨

率 500 m、时间步长 8 d 的 EVI、LSWI、PAR 和气温 (T_a) 数据。EVI 和 LSWI 是由中等分辨率成像光谱仪 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 提供的地表反射率产品 (空间分辨率为 500 m, 时间步长为 8 d) 计算得到。PAR 数据源自 Yan et al.^[37] 利用 MODIS 1B 数据产品、MODIS 的地表反射率产品以及双向反射模型 (BRDF) 参数产品^[38], 通过检索辐射传输模型计算的查找表来反演得到, 空间分辨率 1000 m, 时间步长 16 d。气温资料来自中国气象数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn/>, 地面累日值数据集), 使用 Aunspline4.2 软件基于地形因子进行插值, 获取空间分辨率 500 m、时间步长 8 d 的气温数据。本研究所用的 EVI 年均值由一年 46 期的 8 d EVI 产品求均值得到, GPP 年总量由 VPM 模型输出的一年 46 期的 8 d GPP 数据加和得到。

辅助数据包括降水量、生态系统类型、大气 CO₂ 浓度、大气氮沉降量和县级石漠化治理工程的统计资料。2000—2015 年的降水资料来自中国气象数据共享服务网, 运用 Aunspline4.2 软件基于地形因子进行插值, 获取空间分辨率 500 m 的年降水量数据。2001—2013 年的生态系统类型数据来自 MODIS 的三级土地覆盖产品 (MCD12Q1), 空间分辨率为 500 m, 使用美国马里兰大学的分类方案。为便于分析, 本研究将其合并为林地、灌木、草地、农田和其他等五大生态系统类型。2000—2010 年的大气氮沉降数据来自 Gu et al. 基于 CEVSA2 模型, 根据施肥数据和能源消费数据计算的栅格结果^[39]。2000—2015 年的大气 CO₂ 浓度数据采用夏威夷 Mauna Loa 观测站测定的大气 CO₂ 浓度年均值 (ftp://aftp.cmdl.noaa.gov/products/trends/co2/co2_annmean_mlo.txt)。县级石漠化治理工程的统计资料源自西南喀斯特地区八个省份的林业局提供的 2008—2015 年治理石漠化区域的面积。参照 Tong et al. 的研究^[13], 按石漠化综合治理工程区域面积将 100 个试点县分为较低 (0—50 km²)、中等 (50—100 km²)、较高 (100—200 km²) 和高 (>200 km²) 4 类治理等级。利用 Arcgis10.1 将以上数据均转换为 WGS84—Albers 等面积投影, 空间分辨率统一为 500 m, 时间步长统一为年尺度。

1.4 统计分析方法

1.4.1 趋势分析

利用趋势倾向率 (b) 分析植被 EVI、GPP 和气象因子的年际变化率, 逐栅格进行趋势分析, 公式如下:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i t_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2} \quad (9)$$

式中: x_i 为第 i 年 EVI 年均值、GPP 年总量、年均温或年降水量; n 为研究时段; t_i 为 x_i 对应的时间。 $b > 0$ 说明植被 EVI、GPP 及各气象因子在研究期间呈增加趋势, 反之呈减小趋势。

1.4.2 突变点检测

使用 Mann-Kendall 方法检测 EVI 变化趋势的潜在突变点^[40]。对于具有 n 个样本量的时间序列 x , 构造一个秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (10)$$

$$r_i = \begin{cases} 1, & x_i > x_j \\ 0, & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (11)$$

式中, 秩序列 S_k 是第 i 时刻的数值大于 j 时刻 ($j=1, 2, \dots, i$) 的数值个数的累计数。在时间序列随机独立的假定下, 定义统计量如下:

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{Var(S_k)}}, k = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

式中, $UF_1 = 0$, $E(S_k)$ 和 $Var(S_k)$ 分别是秩矩阵 S_k 的均值和方差。在 x_1, x_2, \dots, x_n 相互独立, 且有相同连续分布时, 它们可以由下式算出:

$$E(S_k) = \frac{n(n+1)}{4} \quad (13)$$

$$\text{Var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (14)$$

式中, UF_k 为标准正态分布,它是按 x_2, \dots, x_n 排序计算出的正向统计量序列。对于相反的序列 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 , 重复上述过程可得到逆向统计量序列 UB_k , 同时使 $UB_k = -UF_k$, $UB_1 = 0$ 。如果 UB_k 和 UF_k 相交, 这个交叉点可能是突变点 ($P < 0.05$)。

1.4.3 回归分析及残差分析

将年均温 (X_T) 和年降水量 (X_P) 对植被 EVI 年均值 (Y) 变化趋势的贡献率 (f_i) 定义为预测变量的趋势及其回归系数的乘积, 回归方程和贡献率分别表示为:

$$Y = b_0 + b_T X_T + b_P X_P + \varepsilon \quad (15)$$

$$f_i = \frac{d(b_i * X_i)}{dt}, i = P, T \quad (16)$$

式中, i 为研究时段; b_T 和 b_P 分别是年均温和年降水量的回归系数; b_0 是常数项; ε 是残差。残差分析法首先将植被 EVI 年均值与年均温、年降水量等气象数据建立回归方程, 利用回归方程得到植被 EVI 预测值, 进而计算得到实测值与预测值之间的差。只有在植被 EVI 年均值与气候因子存在显著相关的区域, 假定实测值与预测值的差消除了气候变化对植被 EVI 年均值的影响, 采用 EVI 残差趋势变化来反映非气候因子对植被覆盖的影响^[19]。需要注意的是, 由于缺乏与植被 EVI 匹配、时空连续的大气 CO_2 浓度数据和大气氮沉降数据, 无法逐栅格建立大气 CO_2 浓度、大气氮沉降与植被 EVI 的多元回归方程。因此, 本研究在上述多元回归分析的基础上, 对年均 EVI 与大气 CO_2 浓度和大气氮沉降数据进行简单线性回归分析。

2 结果与分析

2.1 植被覆盖及生产力的时空动态

2000—2015 年中国西南喀斯特地区植被 EVI 均值分布在 0.28—0.33 之间, 呈显著增加趋势 ($P < 0.05$), 年增长率为 0.0022。Mann—Kendall 检验显示, 正向统计量序列 (UF) 与逆向统计量序列 (UB) 曲线在 2008 年附近相交, 表明 2008 年前后植被 EVI 存在显著差异, 应分段进行统计分析 (图 2)。2000—2007 年, 植被年均 EVI 变化不显著 ($P = 0.21$); 2008 年实施石漠化治理工程以来, 植被年均 EVI 的增速变快 (图 2)。与 2000—2007 年相比, 2008—2015 年中国西南喀斯特地区植被 EVI 的均值和变化率分别偏高 6.9% 和 85.7%, 其中喀斯特生态系统与非喀斯特生态系统植被 EVI 的均值分别由原来的 0.294 和 0.292 增加至 0.313 和 0.311, EVI 年增长率分别由原来的 0.0016 和 0.0013 增加至 0.0027 和 0.0026。

逐栅格分析显示, 2000—2015 年中国西南喀斯特地区大部分区域 (88.4%) 植被 EVI 年均值呈增加趋势 (图 3)。增加最为明显的地区主要分布在四川东部、湖南南部及广西中部, 平均年增长率为 0.0033 以上, 其中 58.8% 的区域增加趋势达到显著水平。植被 EVI 呈减少趋势的区域仅占西南喀斯特地区总面积的 11.6%, 主要集中在四川西部和云南北部, 平均年减少率为 -0.0015。2000—2007 年中国西南喀斯特地区仅有 7.9% 的区域植被 EVI 发生显著变化 (图 3), 显著增加的区域主要分布在湖北及重庆北部。而 2008—2015 年中国西南喀斯特地区植被 EVI 发生显著变化 ($P < 0.05$) 区域面积占西南喀斯特地区总面积的 15.8%, 其中植被 EVI 显著增加的区域占总面积的 13.4%, 主要位于四川东部、湖南南部及广西中部; 植被 EVI 显著减少的区域仅占 2.4%, 主要位于云南北部、湖北东部及湖南北部 (图 3)。2008—2015 年植被 EVI 变化率大于 2000—2007 年的区域覆盖西南喀斯特地区的 62.1%, 并且 2008 年以后植被 EVI 增加的区域面积比 2000—2007 年增加了 12%。

因此, 下文重点以 2008—2015 年中国西南喀斯特地区植被 EVI 发生显著变化区域为研究区进行统计分

析(表 1)。该区域 2008—2015 年植被 EVI 以每年 0.0062 ($P < 0.05$) 的速率显著增加,显著高于 2000—2007 年 0.0025 ($P = 0.09$) 的年变化率(表 1)。尽管该区域年 GPP 的平均值和最大值在两个时段间没有显著变化,但 2008 年以来该区域年 GPP 的增长率明显高于之前。其中,2008—2015 年植被 EVI 显著增加区域内年 GPP 呈显著增加趋势($P < 0.05$),变化率为 $20.58 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$;而同期植被 EVI 显著减少区域内年 GPP 呈显著减少趋势($P < 0.05$),变化率为 $-17.21 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。植被 EVI 和 GPP 均增加的区域占研究区的 12.7%,主要位于四川中部、湖南南部、广西中部和云南东部的喀斯特生态系统;研究区有 0.9% 的区域植被 EVI 和 GPP 均减少,主要位于云南北部、重庆西部和湖北东部;而二者变化不同步的区域面积很小(图 3)。

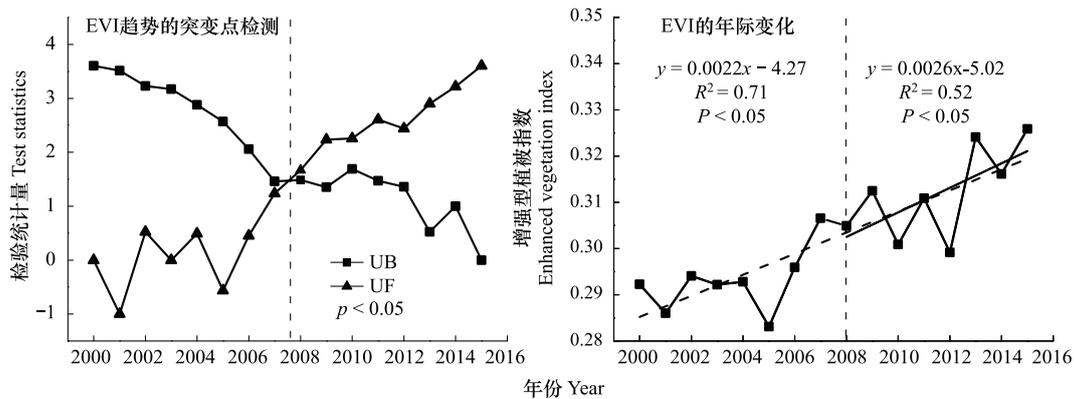


图 2 2000—2015 年植被 EVI 年际变化与突变点检测

Fig.2 Inter-annual variations and abrupt changes of EVI from 2000 to 2015

尽管喀斯特生态系统植被 EVI 与 GPP 的平均值和最大值与非喀斯特生态系统相当,但喀斯特生态系统植被 EVI 与 GPP 的增长率明显高于非喀斯特生态系统(表 1)。对 2000—2007 年、2008—2015 年两个时段内同一研究区域的植被 EVI、GPP 进行独立样本 T 检验,结果显示两个时段内西南喀斯特地区以及喀斯特生态系统内植被 EVI 均值存在显著差异 ($F = 5.05, P < 0.05$; $F = 6.40, P < 0.05$),且喀斯特生态系统年 GPP 最大值也具有显著差异 ($F = 6.20, P < 0.05$)。这表明与非喀斯特生态系统相比,2008 年以来中国西南喀斯特地区的喀斯特生态系统植被覆盖和生产力表现出快速增加趋势。

表 1 2008—2015 年 EVI 显著变化区域内 EVI 和 GPP 统计结果

Table 1 Statistical results of EVI and GPP in region of significant changes in EVI from 2008 to 2015

统计区域和时段 Statistical regions and periods	增强型植被指数 Enhanced Vegetation Index, EVI			总初级生产力 Gross Primary Productivity, GPP		
	平均值 Mean value	最大值 Maximum value	变化率 Rate of change /(a^{-1})	平均值 Mean value /($\text{gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)	最大值 Maximum value /($\text{gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)	变化率 Rate of change /($\text{gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)
	西南喀斯特地区 Karst region of southwest China					
2000—2007 年	0.295±0.007b	0.601 ± 0.015a	0.0025	1 176 ± 49a	4 661±268a	4
2008—2015 年	0.319±0.015a	0.632 ± 0.013a	0.0062 **	1 154 ± 52a	4 911 ± 136a	17 *
2000—2015 年	0.308±0.017	0.617 ± 0.021	0.0024 **	1 165 ± 52	4 798 ± 247	1
喀斯特生态系统 Karst ecosystem						
2000—2007 年	0.292±0.007b	0.525 ± 0.010a	0.0026	1 098 ± 44a	3 680 ± 195b	4
2008—2015 年	0.314±0.016a	0.553 ± 0.019a	0.0064 **	1 085 ± 59a	4 078 ± 482a	19 *
2000—2015 年	0.305±0.017	0.541 ± 0.021	0.0025 **	1 092 ± 52	3 879 ± 418	2
非喀斯特生态系统 Non-karst ecosystem						
2000—2007 年	0.296±0.007a	0.586 ± 0.018a	0.0025	1 209 ± 52a	4 403 ± 335a	4
2008—2015 年	0.320±0.014a	0.605 ± 0.021a	0.0051 **	1 182 ± 49a	4 794 ± 306a	17 *
2000—2015 年	0.309±0.016	0.596±0.022	0.0024 **	1 196 ± 52	4 598 ± 376	0.1

表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平存在显著差异; * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$

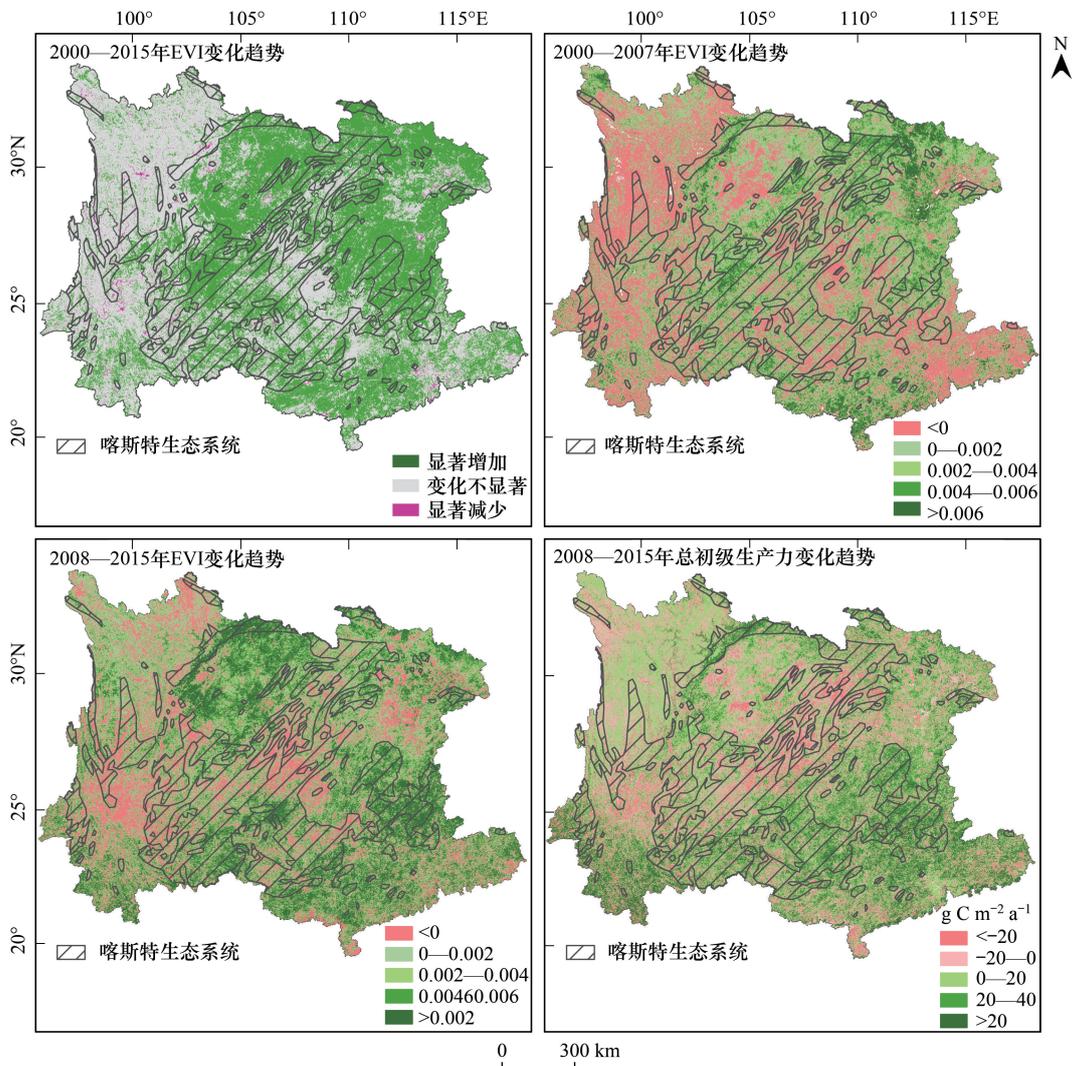


图3 EVI和GPP的变化趋势

Fig.3 The changing trends of EVI and GPP

2.2 植被变化的驱动因子分析

中国西南喀斯特地区植被覆盖变化受气候、大气 CO_2 浓度、大气氮沉降和人类活动等多种因素的共同影响。从总体上看,2008—2015年该区域年均温和年降水量均无显著变化趋势,年均温和年降水量与植被 EVI 亦无显著相关关系(图4)。但逐栅格统计分析结果表明,大部分地区(85.4%)植被 EVI 与气候因子(即年均温和年降水量)显著相关($P < 0.05$),特别是四川东部、湖南南部及广西中部等地区。多元回归分析显示,年均温和年降水量对植被 EVI 增加趋势的贡献分别为 24.6%和 3.7%,这表明该区域植被 EVI 的显著增加主要源于除气候外的其他因子。根据 2008—2013 年的生态系统类型转换统计结果(表2),该区域生态系统类型的转变主要表现为农田转为林地和草地、草地转为林地,其中 9.1%的农田转为林地和草地,7.7%的草地转为林地,其它类型变化面积非常小。总体上,林地和灌木面积增加了 $222.06 \times 10^2 \text{ km}^2$;草地、农田及其他地类的面积均有不同程度减少。2008—2015年大气 CO_2 浓度呈显著增加趋势($P < 0.05$),与植被 EVI 显著正相关(图4)。此外,基于 Gu et al.的大气氮沉降估算结果^[39],2000 年以来该区域大气氮沉降呈显著增加趋势($P < 0.05$),并且该时段内植被 EVI 与大气氮沉降呈显著正相关(图4)。上述结果表明,2008—2015 年因实施石漠化治理工程导致的土地覆盖变化及大气 CO_2 浓度、大气氮沉降的持续增加可能是引起植被覆盖趋势增加的重要原因。

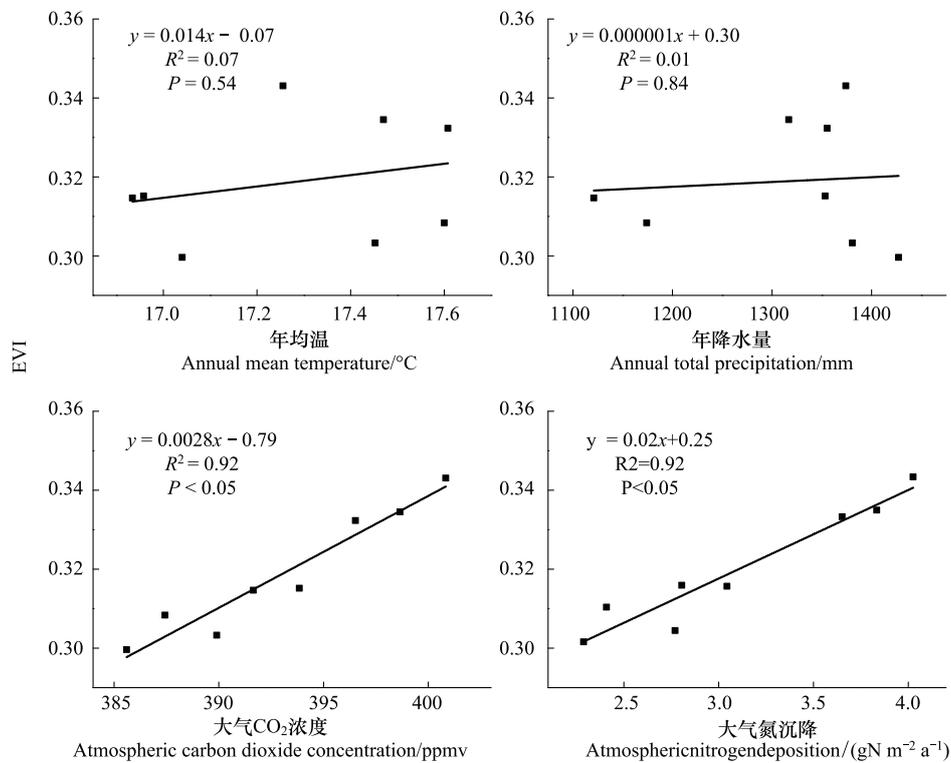


图 4 2008—2015 年 EVI 与气候因子、大气 CO₂ 浓度及大气氮沉降的关系

Fig.4 The relationships between EVI and climatic factors, atmospheric carbon dioxide concentration, atmospheric nitrogen deposition from 2008 to 2015

表 2 2008—2013 年生态系统类型转移矩阵/(×10² km²)

Table 2 The ecosystem type transfer matrix from 2008 to 2013

2008 年	2013 年						变化面积 The area of change
	林地 Forest land	灌木 Shrub	草地 Grassland	农田 Farmland	其他 Others	合计 Total	
林地 Forest land	—	1.13	14.92	51.53	1.19	820.15	222.06
灌木 Shrub	6.62	—	5.82	3.54	0.23	10.77	1.32
草地 Grassland	205.92	4.66	—	127.85	1.20	838.81	-159.96
农田 Farmland	83.04	5.00	157.91	—	1.13	938.48	-63.35
其他 Others	1.87	0.12	1.02	0.81	—	53.57	-0.07
合计 Total	1042.21	12.09	678.85	875.13	53.50	2661.78	—

针对植被 EVI 与气候因子显著相关的区域,对比分析了首批 100 个石漠化治理试点县及其他喀斯特生态系统 2008—2015 年植被覆盖和生产力趋势的差异。结果表明,100 个试点县内植被 EVI 年均值和 GPP 年总量的增长率分别为 0.0067 a⁻¹ 和 20.4 gC m⁻² a⁻¹,均高于其他喀斯特生态系统(0.0053 a⁻¹ 和 13.85 gC m⁻² a⁻¹)。因此,计算 100 个试点县内实测 EVI 与预测 EVI 的差,并进行趋势拟合。结果表明 2008—2015 年在非气候因子的主导作用下,100 个试点县有 94% 的区域植被 EVI 表现出增加趋势。进一步对不同治理等级下非气候因子主导的植被 EVI 变化趋势以及植被 EVI、GPP、大气氮沉降变化趋势进行了方差分析(表 3)。结果显示,在非气候因子的影响下,大部分试点县(82%)的植被 EVI 呈显著增加趋势($P < 0.05$);不同治理等级间的植被趋势存在显著差异($F = 2.71, P < 0.05$),并且随着治理面积的增大而增高。同时,植被 EVI 和 GPP 的平均增长率也表现出随着治理面积的增加而变大的趋势,但统计上未达到显著水平。尽管大气氮沉降变化率也存在显著差异($F = 6.51, P < 0.05$),但治理等级最高的地区其大气氮沉降增加率反而低于其他三个等级。这表明石漠化

综合治理工程的实施有效地促进了试点县植被覆盖的增加,而大气氮沉降并非植被变化趋势差异的主要影响因素。

表 3 2008—2015 年不同治理强度下非气候因子主导的植被覆盖及植被覆盖、生产力、大气氮沉降的变化率

Table 3 Trend of vegetation change dominated by non-climatic factors, EVI, GPP and atmospheric nitrogen deposition under different treatment intensities from 2008 to 2015

治理面积 The area of administration/km ²	治理等级 The level of administration	非气候因子主导 的植被变化率 The changing rate of vegetation dominated by non-climatic factors/a ⁻¹	EVI 变化率 The changing rate of EVI/(a ⁻¹)	GPP 变化率 The changing rate of GPP/(gC m ⁻² a ⁻¹)	大气氮沉降变化率 The changing rate of atmospheric nitrogen deposition/ (gN m ⁻² a ⁻¹)
< 50	较低	0.0022±0.0010b	-0.0006 ± 0.0018a	-0.05 ± 11.7a	0.34± 0.026a
50—100	中等	0.0046±0.0008a	0.0024 ± 0.0019a	3.45 ± 9.79a	0.32±0.025a
100—200	较高	0.0037±0.0008ab	0.0023 ± 0.0020a	3.95 ± 10.37a	0.31±0.029a
> 200	高	0.0053±0.0007a	0.0044 ± 0.0016a	14.36 ± 9.89a	0.24± 0.018b

表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平存在显著差异

3 讨论

在自然和人为因素的共同影响下,中国西南喀斯特地区的植被覆盖状况呈现持续增长的趋势,主要表现为 2000 年以来植被指数增加速率^[13,41]明显高于 20 世纪最后 20 年^[11]。在此基础上,本研究进一步揭示了 2008 年实施石漠化综合治理工程以来,该地区植被 EVI 的增长速率相比 2000—2007 年明显增加,特别是喀斯特生态系统植被 EVI 的显著增加在很大程度上源于石漠化综合治理等人类活动的作用。这与前人基于遥感数据和模型的研究结果较为一致,即生态工程的实施在很大程度上促进了西南喀斯特地区植被覆盖及生产力的增加,而气候因子的促进作用较小^[13,19]。退耕还林(草)、宜林荒山荒地和人工造林种草等工程措施引起的土地覆盖类型变化和林地、草地面积增加是该区域植被覆盖和生产力提高的重要原因。首先,在坡耕地上人工种草及经果林和水保林的种植有效调节了土壤容重和孔隙度,增加土壤保水能力,改善土壤结构,提高了土壤的抗侵蚀性^[42]。其次,坡改梯、排灌沟渠、蓄水池等小型水利水保配套措施的建设实现了降坡保土、合理拦蓄和利用水资源,有效地改善了石漠化地区土壤水分供应状况,在一定程度上缓解了喀斯特生态系统因大部分地表降水通过岩体缝隙和地下水系管网流入地下深处造成的地表干旱缺水现象^[43]。此外,封山育林育草能够增加地上凋落物和根系转向土壤的营养输入,增加土壤养分含量^[44]。由国家和地方政府采取的一系列生态恢复措施改变了植被生长发育的环境条件,促进了植被指数的增加和生产力的提高。尽管石漠化综合治理工程的实施有效地促进了试点县植被 EVI 的增加,但工程实施面积大、投入资金多并不一定代表工程带来的效益高,工程效益还受到气候、地形及人类管理等要素的影响^[13]。本研究发现云南北部、湖北东部及湖南北部等局部地区存在植被退化趋势。干旱可能是导致该区域植被覆盖和生产力下降的主要原因之一。2008—2015 年植被退化区域内年均温和年降水量均未发生显著变化,但 2009 年和 2011 年的降水量比多年均值(1097 mm)低 14%,限制了植被的生长发育。其他研究也表明,2009 年秋至 2010 年春中国西南大部分地区遭受的极端干旱造成了经济林和天然植被大面积枯死,2009—2011 年中国西南大部分地区植被 NPP 比 2001—2011 年平均值偏低 12.55 gC m⁻² a⁻¹^[45]。同时,生态系统类型的变化也可能是导致植被长势变差的另一个重要原因。该区域 72%的面积发生了生态系统类型转变,主要表现为林地、灌木和农田转变为城市建成区及裸地。这些转变可能主要源自城市扩张,部分居民开垦新的耕地^[13],以及非法采伐、过度放牧等其他人类开发利用活动的不断扩张。这表明中国西南喀斯特地区在巨大的经济社会发展压力下,生态修复和治理仍是一个长期的过程,需要国家和地方政府进一步的政策引导和技术投入。

生态工程的实施对生态系统过程和功能的影响具有复杂性。大规模的造林可能会使植被蒸腾增加,消耗

更多的水分,导致造林区域植被覆盖度降低^[46]。人工种植的大多是非本地的、快速生长的单一物种,会使群落结构单一化,对生物多样性产生不利影响,可能导致植被演替的中断或逆向发展^[47]。植树造林会导致树木冠层以下光照的减小,影响林下植物的光合作用^[48]。目前的研究仅着眼于生态工程对植被覆盖和生产力的影响,并没有综合评估生态工程对其他生态功能的影响。因此,需要补充地面观测数据,进一步评估工程对土壤侵蚀、生物多样性的影响,并考虑生态系统功能的权衡与协同关系^[49-51],以便更进一步地定量评估石漠化治理工程的综合效益,从而支持更有效和更灵活的环境恢复政策。政府和决策者应该充分考虑当地的实际情况,因地制宜地制定和调整环境政策。

本研究采用统计方法分析了 2008—2015 年中国西南喀斯特地区植被的时空变化特征及其对环境因子的响应,并评估了石漠化综合治理工程的效益,为增强对喀斯特生态系统自然过程的认识和生态工程建设及科学管理提供了依据。为从机理上揭示该地区植被生长状况与各因子之间的内在联系,今后还需要结合长期和系统的观测与实验,获取长时间序列的大气 CO₂ 浓度、大气氮沉降空间数据,并借助于生态系统过程模型来加强认识和理解,从而能够在未来定量地区分气候变化、大气 CO₂ 浓度、大气氮沉降及人类活动对植被动态的影响。此外,由于目前还无法获得石漠化综合治理工程实施的具体位置信息,对工程实施效果的评估主要是基于县域尺度统计数据,今后应进一步开展工程实施区的定位工作,更准确地分析工程实施区域的植被变化趋势。

4 结论

本文利用 MODIS EVI 产品和遥感光能利用率模型 VPM 模拟的 GPP 数据,分析了 2000—2015 年中国西南喀斯特地区植被 EVI 年均值和 GPP 年总量变化的时空特征及其对石漠化综合治理工程以及气候变化等环境因子的响应,评估了 2008 年来首批石漠化综合治理 100 个试点县内工程实施对植被覆盖的影响。主要研究结论如下:

(1) 2000—2015 年中国西南喀斯特地区植被 EVI 呈显著增加趋势,年际变化率为 0.0022 a⁻¹。与 2000—2007 年相比,2008—2015 年中国西南喀斯特地区植被 EVI 的均值和变化率分别偏高 6.9% 和 85.7%。16 年来中国西南喀斯特地区 88.4% 的区域植被 EVI 呈增加趋势,增加最为明显的地区主要分布在四川东部、湖南南部、广西中部,其中 58.8% 的区域增加趋势达到显著水平。2008—2015 年植被 EVI 变化率大于 2000—2007 年的区域覆盖西南喀斯特地区面积的 62.1%。

(2) 2008 年实施石漠化综合治理工程以来,中国西南喀斯特地区植被覆盖和生产力的增长速率变快,主要位于四川中部、湖南南部、广西中部和云南东部。2008—2015 年植被 EVI 发生显著变化区域面积占西南喀斯特地区总面积的 15.8%。该区域 2008 年以来植被 EVI 以每年 0.0062 的速率显著增加,明显高于 2000—2007 年的变化率;年 GPP 的增加趋势也明显高于之前。尽管喀斯特生态系统植被 EVI 与 GPP 的年均值和最大值与非喀斯特生态系统相当,但喀斯特生态系统植被 EVI 与 GPP 的增长率明显高于非喀斯特生态系统。

(3) 中国西南喀斯特地区植被覆盖变化受气候、大气 CO₂ 浓度、大气氮沉降和人类活动等多种因素的共同影响。气温和降水对 2008—2015 年植被 EVI 增加趋势的综合贡献低于 30%,生态系统类型的转变主要表现为农田转为林地和草地、草地转为林地。由于石漠化综合治理工程的实施引起的生态系统类型变化(退耕还林还草)及大气 CO₂ 浓度、大气氮沉降的增加可能是引起植被覆盖趋势增加的重要原因。

(4) 对首批 100 个石漠化治理试点来说,大部分试点县植被覆盖的增加趋势主要受非气候因子的影响。非气候因子主导的植被 EVI 变化趋势随着治理面积的增大而增高,这表明石漠化综合治理工程的实施有效地促进了试点县植被覆盖的增加。尽管大气氮沉降会促进植被生长,但它并不是该区域植被变化趋势空间差异的主要影响因素。

参考文献 (References):

[1] 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. 草业科学, 2008, 25(9): 19-25.

- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 国家发展改革委, 国家林业局, 农业部, 水利部. 关于印发《岩溶地区石漠化综合治理工程“十三五”建设规划》的通知. (2016-03-21) [2017-09-15]. http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201604/t20160422_798771.html.
- [6] 国家林业局. 中国石漠化状况公报. 北京: 国家林业局, 2012.
- [7] Zhang L, Xiao J F, Li J, Wang K, Lei L P, Guo H D. The 2010 spring drought reduced primary productivity in southwestern China. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(4): 045706.
- [8] 刘世梁, 董玉红, 安南南, 王军, 赵海迪. 基于增强型植被指数序列和景观格局分析的松嫩平原盐碱地动态——以大安市为例. 应用生态学报, 2014, 25(11): 3263-3269.
- [9] Chapin III F S, Matson P A, Mooney H A. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. New York: Springer, 2002.
- [10] Zhou T, Luo Y Q. Spatial patterns of ecosystem carbon residence time and NPP-driven carbon uptake in the conterminous United States. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22(3): GB3032.
- [11] 蒙吉军, 王钧. 20世纪80年代以来西南喀斯特地区植被变化对气候变化的响应. 地理研究, 2007, 26(5): 857-866.
- [12] Tong X W, Brandt M, Yue Y M, Horion S, Wang K L, De Keersmaecker W, Tian F, Schurgers G, Xiao X M, Luo Y Q, Chen C, Myneni R, Shi Z, Chen H S, Fensholt R. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering. *Nature Sustainability*, 2018, 1(1): 44-50.
- [13] Tong X W, Wang K L, Yue Y M, Brandt M, Liu B, Zhang C H, Liao C J, Fensholt R. Quantifying the effectiveness of ecological restoration projects on long-term vegetation dynamics in the karst regions of Southwest China. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 2017, 54: 105-113.
- [14] 童晓伟, 王克林, 岳跃民, 廖楚杰, 徐艳芳, 朱海涛. 桂西北喀斯特区域植被变化趋势及其对气候和地形的响应. 生态学报, 2014, 34(12): 3425-3434.
- [15] 杨世凡, 安裕伦. 生态恢复背景下喀斯特地区植被覆盖的时空变化——以黔中地区为例. 地球与环境, 2014, 42(3): 404-412.
- [16] Brandt M, Yue Y M, Wigneron J P, Tong X W, Tian F, Jepsen M R, Xiao X M, Verger A, Mialon A, Al-Yaari A, Wang K L, Fensholt R. Satellite-observed major greening and biomass increase in South China karst during recent decade. *Earth's Future*, 2018, 6(7): 1017-1028.
- [17] Zhang M Y, Wang K L, Liu H Y, Zhang C H, Wang J, Yue Y M, Qi X K. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of vegetation carbon sequestration in the karst area of northwest Guangxi, China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(6): 5307-5317.
- [18] 张明阳, 王克林, 刘会玉, 章春华, 段亚峰. 基于遥感影像的桂西北喀斯特区植被碳储量及密度时空分异. 中国生态农业学报, 2013, 21(12): 1545-1553.
- [19] 李昊, 蔡运龙, 陈睿山, 陈琼, 严祥. 基于植被遥感的西南喀斯特退耕还林工程效果评价——以贵州省毕节地区为例. 生态学报, 2011, 31(12): 3255-3264.
- [20] 丁文荣. 滇东南喀斯特地区植被覆盖变化及其影响因素. 水土保持研究, 2016, 23(6): 227-231, 237-237.
- [21] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration. *Earth-Science Reviews*, 2014, 132: 1-12.
- [22] 刘璐, 曾馥平, 宋同清, 彭晚霞, 王克林, 翟文更, 谭卫宁. 喀斯特木论自然保护区土壤养分的空间变异特征. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1667-1673.
- [23] 袁道先. “岩溶作用与碳循环”研究进展. 地球科学进展, 1999, 14(5): 425-432.
- [24] Xiao X M, Zhang Q Y, Braswell B H, Urbanski S P, Boles S, Wofsy S C, Moore III B, Ojima D. Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(2): 256-270.
- [25] Xiao X M, Hollinger D, Aber J, Goltz M, Davidson E A, Zhang Q Y, Moore III B. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(4): 519-534.
- [26] Raich J W, Rastetter E B, Melillo J M, Kicklighter D W, Stuedler P A, Peterson B J, Grace A L, Moore III B, Vorosmarty C J. Potential net primary productivity in south America: application of a global model. *Ecological Applications*, 1991, 1(4): 399-429.
- [27] 陈静清, 闫慧敏, 王绍强, 高艳妮, 黄玫, 王军邦, 肖向明. 中国陆地生态系统总初级生产力 VPM 遥感模型估算. 第四纪研究, 2014, 34(4): 732-742.
- [28] 牛忠恩, 闫慧敏, 陈静清, 黄玫, 王绍强. 基于 VPM 与 MOD17 产品的中国农田生态系统总初级生产力估算比较. 农业工程学报, 2016, 32(4): 191-198.
- [29] 牛忠恩, 闫慧敏, 黄玫, 胡云锋, 陈静清. 基于 MODIS-OLI 遥感数据融合技术的农田生产力估算. 自然资源学报, 2016, 31(5): 875-885.
- [30] Liu H Q, Huete A. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on*

- Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(2): 457-465.
- [31] Xiao X, Boles S, Frohling S, Sales S, Moore III B, Li C, He L, Zhao R. Observation of flooding and rice transplanting of paddy rice fields at the site to landscape scales in China using VEGETATION sensor data. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(15): 3009-3022.
- [32] Wu J B, Xiao X M, Guan D X, Shi T T, Jin C J, Han S J. Estimation of the gross primary production of an old-growth temperate mixed forest using eddy covariance and remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(2): 463-479.
- [33] 伍卫星, 王绍强, 肖向明, 于贵瑞, 伏玉玲, 郝彦宾. 利用 MODIS 影像和气候数据模拟中国内蒙古温带草原生态系统总初级生产力. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38(8): 993-1004.
- [34] Yan H M, Fu Y L, Xiao X M, Huang H Q, He H L, Ediger L. Modeling gross primary productivity for winter wheat-maize double cropping system using MODIS time series and CO₂ eddy flux tower data. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 129(4): 391-400.
- [35] Xin F F, Xiao X M, Zhao B, Miyata A, Baldocchi D, Knox S, Kang M S, Shim K M, Min S H, Chen B Q, Li X P, Wang J, Dong J W, Biradar C. Modeling gross primary production of paddy rice cropland through analyses of data from CO₂ eddy flux tower sites and MODIS images. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 190: 42-55.
- [36] Kang X M, Wang Y F, Chen H, Tian J Q, Cui X Y, Rui Y C, Zhong L, Kardol P, Hao Y B, Xiao X M. Modeling carbon fluxes using multi-temporal MODIS imagery and CO₂ eddy flux tower data in Zoige Alpine Wetland, South-West China. *Wetlands*, 2014, 34(3): 603-618.
- [37] Yan H M, Xiao X M, Huang H Q, Liu J Y, Chen J Q, Bai X H. Multiple cropping intensity in china derived from agro-meteorological observations and MODIS data. *Chinese Geographical Science*, 2014, 24(2): 205-219.
- [38] Liu R G, Liang S L, He H L, Liu J Y, Zheng T. Mapping incident photosynthetically active radiation from MODIS data over China. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(3): 998-1009.
- [39] Gu F X, Zhang Y D, Huang M, Tao B, Yan H M, Guo R, Li J. Nitrogen deposition and its effect on carbon storage in Chinese forests during 1981-2010. *Atmospheric Environment*, 2015, 123: 171-179.
- [40] Chatterjee S, Bisai D, Khan A. Detection of approximate potential trend turning points in temperature time series (1941-2010) for Asansol Weather Observation Station, West Bengal, India. *Atmospheric and Climate Sciences*, 2014, 4(1): 64-69.
- [41] 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.
- [42] 孙泉忠, 刘瑞禄, 陈菊艳, 张云平. 贵州省石漠化综合治理人工种草对土壤侵蚀的影响. *水土保持学报*, 2013, 27(4): 67-72, 77-77.
- [43] Sweeting M M. Reflections on the development of Karst geomorphology in Europe and a comparison with its development in China. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 1993, 37: 127-136.
- [44] 肖金玉, 蒲小鹏, 徐长林. 禁牧对退化草地恢复的作用. *草业科学*, 2015, 32(1): 138-145.
- [45] 赵志平, 吴晓蕾, 李果, 李俊生. 2009-2011 年我国西南地区旱灾程度及其对植被净初级生产力的影响. *生态学报*, 2015, 35(2): 350-360.
- [46] Zhang Y, Peng C H, Li W Z, Tian L X, Zhu Q, Chen H, Fang X Q, Zhang G L, Liu G B, Mu X M, Li Z B, Li S Q, Yang Y Z, Wang J, Xiao X M. Multiple afforestation programs accelerate the greenness in the 'Three North' region of China from 1982 to 2013. *Ecological Indicators*, 2016, 61: 404-412.
- [47] Macias-Fauria M. Satellite images show China going green. *Nature*, 2018, 553(7689): 411-413.
- [48] Cao S X, Chen L, Shankman D, Wang C M, Wang X B, Zhang H. Excessive reliance on afforestation in China's arid and semi-arid regions: lessons in ecological restoration. *Earth-Science Reviews*, 2011, 104(4): 240-245.
- [49] Bennett E M, Peterson G D, Gordon L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters*, 2009, 12(12): 1394-1404.
- [50] Jia X Q, Fu B J, Feng X M, Hou G H, Liu Y, Wang X F. The tradeoff and synergy between ecosystem services in the Grain-for-Green areas in Northern Shaanxi, China. *Ecological Indicators*, 2014, 43: 103-113.
- [51] Lu N, Fu B J, Jin T T, Chang R Y. Trade-off analyses of multiple ecosystem services by plantations along a precipitation gradient across Loess Plateau landscapes. *Landscape Ecology*, 2014, 29(10): 1697-1708.