

DOI: 10.5846/stxb202101260270

茆杨, 蒋勇军, 张彩云, 乔伊娜, 吕同汝, 邱菊. 近 20 年来西南地区植被净初级生产力时空变化与影响因素及其对生态工程响应. 生态学报, 2022, 42(7): 2878-2890.

Mao Y, Jiang Y J, Zhang C Y, Qiao Y N, Lü T R, Qiu J. Spatio-temporal changes and influencing factors of vegetation net primary productivity in southwest China in the past 20 years and its response to ecological engineering. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(7): 2878-2890.

近 20 年来西南地区植被净初级生产力时空变化与影响因素及其对生态工程响应

茆 杨, 蒋勇军*, 张彩云, 乔伊娜, 吕同汝, 邱 菊

西南大学地理科学学院, 岩溶环境重庆市重点实验室, 重庆 400715

摘要: 植被净初级生产力(NPP)是研究陆地生态系统中物质和能量转换的重要指标, NPP的空间分布与区域气候、植被生长以及人类活动等息息相关, 其变化能反映植被群落的生产能力, 是生态系统功能和结构变化的重要表征。近 20 年来, 中国西南地区植被 NPP 呈现增长趋势。然而, 目前对 NPP 时空变化格局及潜在原因尚不清楚。因此, 利用 2001—2018 年间 MODIS-NPP、岩性、气候、土地利用、造林面积和石漠化治理情况等数据, 对西南地区植被 NPP 的时空变化趋势及其成因进行了分析。结果发现: (1) 2001—2018 年间, 中国西南地区植被 NPP 总体呈增长趋势, 突变分析结果显示, 2012—2018 年间 NPP 的增长速度($5.13 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)比 2001—2011 年更快($1.78 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$), 在两个时段, 岩溶区 NPP 增长速度都高于非岩溶区; (2) 对西南地区植被 NPP 变化与气候因子的相关分析结果显示, 2001—2011 年与 2012—2018 年两个时间段内 NPP 与温度的平均相关性($R=0.19, 0.26$)要高于 NPP 与降水的平均相关性($R=0.07, 0.05$), 表明西南地区植被 NPP 更容易受到温度的影响; (3) 对两个时期土地利用变化下 NPP 总量的变化情况的研究结果显示, 2001—2011 年期间城市用地面积增加使得 NPP 总量下降, 而 2012—2018 年末利用地面积增长造成了 NPP 总量下降; (4) 2001—2018 年西南地区累计造林面积与 NPP 存在显著正相关性($R=0.7, P<0.05$), 说明“退耕还林”工程实施促进了西南地区 NPP 增长。对石漠化面积统计结果表明, 2011 年后石漠化面积显著减少, 这与 NPP 的突变点一致, 表明石漠化治理对西南地区 NPP 增长有重要促进作用。

关键词: 植被净初级生产力; MODIS; 生态工程; 西南地区

Spatio-temporal changes and influencing factors of vegetation net primary productivity in southwest China in the past 20 years and its response to ecological engineering

MAO Yang, JIANG Yongjun*, ZHANG Caiyun, QIAO Yina, LÜ Tongru, QIU Ju

Chongqing Key Laboratory of Karst Environment & School of Geographical Sciences of Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Vegetation net primary productivity (NPP) is an important indicator for studying material and energy flows in terrestrial ecosystems. The spatial distribution of NPP is closely related to factors such as regional climate, vegetation growth, and human activities. Its changes can reflect the productivity of vegetation communities and are an important characterization of the function and structure change of ecosystem. In the past two decades, vegetation NPP in the Southwest China has shown an increasing trend. However, it is still unclear about the temporal and spatial patterns of the NPP and the underlying reasons. Therefore, this paper uses MODIS-NPP, lithology, climate, land use, afforestation area, and rocky desertification control data from 2001 to 2018 to analyze the spatiotemporal trends and causes of vegetation NPP in the

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502306)

收稿日期: 2021-01-26; 网络出版日期: 2021-12-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiangyj@swu.edu.cn

Southwest China. The results found that: (1) during 2001—2018, vegetation NPP in the Southwest China showed an overall increasing trend. The results of mann-kendall test indicated that the growth rate of NPP ($5.13 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) during 2012—2018 was faster than that in 2001—2011 ($1.78 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$). During 2001—2011 and 2012—2018 the growth rate of NPP in karst areas was higher than that in non-karst areas; (2) The correlation analysis results of vegetation NPP changes and climatic factors in the Southwest China showed that the correlation between NPP changes and temperature ($R=0.19, 0.26$) is higher than that between NPP changes and precipitation ($R=0.07, 0.05$) in both the period of 2001—2011 and 2012—2018, indicating that vegetation NPP in the Southwest China is more susceptible to temperature; (3) The changes of the total amount of NPP under land use changes in 2001—2011 and 2012—2018 showed that the increase in urban land area during 2001—2011 caused the total amount of NPP to decrease, while the area of unused land increase in 2012—2018 resulted in the decrease of the total amount of NPP; (4) The cumulative afforestation area in the Southwest China from 2001 to 2018 was significantly positively correlated with NPP ($R=0.7, P<0.05$), indicating that the implementation of the “Grain for Green Project” promoted the growth of NPP in the Southwest China. The statistical results show that the rocky desertification area has decreased significantly after 2011, which is consistent with the mutation point of NPP, indicating that the control of rocky desertification plays an important role in the growth of NPP in the Southwest China.

Key Words: net primary productivity; MODIS; ecological engineering; Southwest China

陆地植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是单位时间、单位面积下植被光合作用产生的有机质减去植物呼吸作用后剩下的部分^[1],是表征生态系统的碳固存能力^[2]、解释区域生态系统的生产力、可持续性以及生态环境动态演变过程的重要指标^[3]。作为生态系统的重要组成部分,NPP 在碳循环^[4-5]、水循环^[6-7]和土地利用/覆被变化^[8-9]的研究中起着至关重要的作用。因此,研究植被 NPP 变化及其驱动力对于了解区域环境状况和生态环境演变具有重要意义。

对区域植被 NPP 的研究方法主要有实地测量法和模型模拟法,其中模拟模型主要分为四类:气候模型、遥感模型、过程模型和遥感-过程耦合模型^[10]。随着遥感技术的迅速发展,基于遥感-过程耦合模型的遥感数据产品由于其时间和空间分辨率高、获取成本低等特点得到了广泛应用^[11-17]。国内学者利用 MODIS-NPP 产品对地表植被 NPP 进行了大量观测研究,结果表明地表植被 NPP 受到自然或人为因素的影响,如重庆岩溶区 NPP 与温度、降水显著相关,且对年均温有更强的敏感性^[13];太阳辐射和年均温是广西岩溶区 NPP 变化的主要影响因子^[14];温度和降水量的分布差异是河南省 NPP 呈南高北低的主要原因^[15];东北地区植被 NPP 主要受到降水量的制约,且水热波动对 NPP 变化的影响要大于土地利用变化的影响^[17];秦巴山区 NPP 变化对实际蒸散量强烈响应并受到人为因素的双重控制^[16];西南岩溶区太阳辐射的降低抵消了人类活动对 NPP 变化的积极作用^[12]。这些特定地区的研究有利用从区域尺度上理解植被 NPP 的变化,但不同地区、不同时期的自然因子和人为活动有其特殊性,而以往的研究较少关注到西南地区岩性和生态工程实施对植被 NPP 的影响。

我国西南地区是世界上最大裸露碳酸盐岩连片分布地区之一。碳酸盐岩中的土壤形成物质含量低,且具有高度的溶解性,作为土壤母质的碳酸盐岩一方面不溶物含量低,成土速率慢,另一方面由于其岩石独特的二元地质结构,土壤极易随水流失进入地下河系统,地表基岩裸露,石漠化严重,使之成为限制我国西南地区经济发展的重要自然因素。而我国西南地区人口密度大(217 人/km^2),巨大的人口压力附加在脆弱的岩溶生态环境上,使得该地区超过 20%的土壤生产力退化^[18],进一步加剧了西南地区人口贫困,成为脱贫攻坚战中最难解决的一环。植被 NPP 不仅反映了植被群落的生产能力,也是生态系统功能和结构变化的重要表征,对植被 NPP 的研究能为生态脆弱地区治理提供科学指导^[19]。综上所述,了解区域 NPP 特征及其驱动力对生态系统的研究和生态安全发展具有重要意义。

1 研究区概况

研究区位于中国西南部($97^{\circ}21'—117^{\circ}19'E$, $20^{\circ}13'—34^{\circ}19'N$) (图 1), 包括云南、贵州、四川、重庆、广西、广东、湖南和湖北八个省或直辖市, 面积为 $19.5 \times 10^5 \text{ km}^2$, 其中 28% ($5.4 \times 10^5 \text{ km}^2$) 的区域被裸露的碳酸盐岩所覆盖, 即为裸露型岩溶区。其中碳酸盐岩主要由灰岩 (50.07%)、白云岩 (8.75%)、灰岩与白云互层岩 (10.13%) 以及碳酸盐岩与碎屑岩互层岩 (31.05%) 组成。

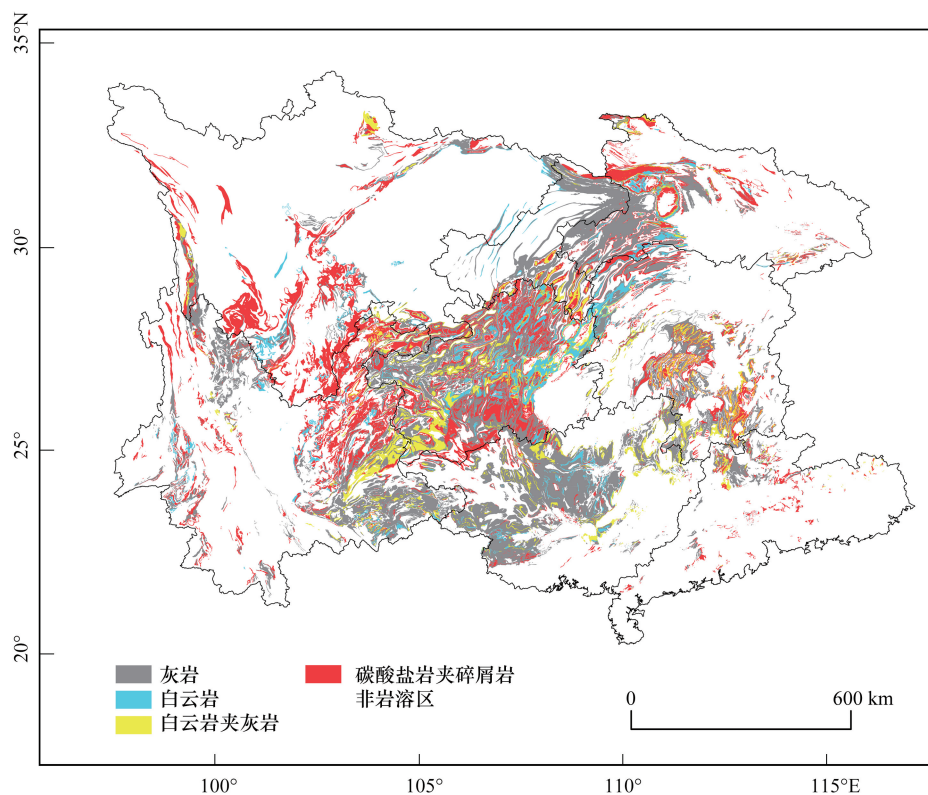


图 1 西南地区位置示意图

Fig.1 The location of Southwest China

2 材料与方法

2.1 数据来源及处理

本研究使用了美国国家航空航天局 (NASA) 提供的 2001—2018 年的 MODIS Terra NPP 数据 (MOD17A3HGF) (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>), 空间分辨率为 500 m。数据下载完成后利用 NASA 官网提供的 MRT 工具进行拼接、裁剪和重投影等预处理, 再利用 Arcgis 10.4 软件剔除其中的异常值后得到 2001—2018 年的年 NPP 数据。

2001—2018 年中国西南地区的 245 个温度、降水气候站点数据来自中国气候数据网 (<http://data.cma.cn/>), 并使用了薄片光滑样条插值法在 ANUSPLIN4.4 中对气候站点数据进行插值, 得到 2001—2018 年的年均降水与温度的空间分布数据, 空间分辨率为 500 m。

由于对应年份数据缺乏, 本文使用了 2000—2018 年土地利用数据, 该数据来自中科院资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn/>)。为了确保数据质量, RESDC 对该数据集进行了质量控制, 土地利用总体精度在 94.3% 以上^[20]。

碳酸盐岩的空间分布数据来自中国地质科学院岩溶地质研究所(<http://www.karst.cgs.gov.cn/>)。

2.2 研究方法

2.2.1 趋势分析

使用一元线性回归法对 NPP 数据进行年际变化的趋势分析,趋势结果用多年栅格数值回归方程的斜率 (Slope) 表示,计算公式为:

$$\text{Slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n i V_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n V_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (1)$$

式中, n 为参与计算数据年数(本研究为 1—18 年), V_i 为第 i 年 NPP 的值。回归方程的斜率 (Slope) 表示 NPP 的平均时间变化;正斜率 (Slope > 0) 表示上升趋势,负斜率 (Slope < 0) 则表示下降趋势。利用等间距划分法,将 Slope 划分为五个等级:显著增长 (Slope ≥ 15)、轻度增长 (5 ≤ Slope < 15)、(-5 ≤ Slope < 5)、轻度降低 (-15 ≤ Slope < -5) 以及显著降低 (Slope ≤ -15) [21]。

2.2.2 突变分析

Mann-Kendall 检验是一种非参数检验方法,它不对数据采用任何分布形式,被广泛用于识别所考虑的时间序列数据中的变化点 [22—23]。使用年度 NPP 时间序列计算前向 (UF) 和后向 (UB) 统计序列。

Mann-Kendall 突变检验过程为:

$$d_k = \sum_{i=1}^k \text{NPP}_i \quad (2)$$

$$\text{Var}(d_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (3)$$

$$E(d_k) = \frac{k(k-1)}{4} \quad (4)$$

$$UF_k = \frac{d_k - E(d_k)}{\sqrt{\text{var}(d_k)}} \quad (5)$$

式中, NPP_i 表示第 i 年 NPP 的值, k 表示时间序列的长度。后向统计序列 UB_k 由公式 (2) 和 (5) 计算得出。当 UF 大于 0 时表示 NPP 呈上升趋势,反之则表示下降趋势。置信区间 ($P < 0.05$, 区间为 ±1.96) 内的两条序列曲线的交点被确定为 NPP 变化的转折点。

2.2.3 偏相关分析

使用偏相关分析可以在多要素系统中在不考虑其他要素影响的情况下研究某一要素对另一要素的影响,偏相关系数计算公式为:

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2) - (1 - r_{yz}^2)}} \quad (6)$$

式中, r_{xy} 是变量 x 和 y 的简单相关系数, r_{xz} 是变量 x 和 z 的简单相关系数, r_{yz} 是变量 y 和 z 的简单相关系数。

3 结果

3.1 西南地区 NPP 时间变化

2001—2018 年的 18 年间,西南地区植被 NPP 呈现出波动增长趋势 (图 2),从 2001 年的 $706.65 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 增长至 2018 年的 $756.93 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,每年的年均增长为 $3.0424 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($P < 0.01$),其中最低值和最高值分别出现在 2005 年和 2015 年,为 $703.2 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $778.69 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

通过对西南地区 2001—2018 年间 NPP 进行突变分析的结果显示 (图 3),UF 和 UB 的曲线在 2011 年左右相交且处于置信区间 ($P < 0.05$) 内,这个时间节点可以认为是 NPP 变化趋势的突变点。基于突变分析的结果,将 NPP 的时间序列分为 2001—2011 和 2012—2018 年两个序列。对两个时间序列的植被 NPP 进行趋势

分析结果显示 2001—2011 年与 2012—2018 年两个时段 NPP 都保持增长趋势,但两个时间段的增长速率不同,2012—2018 年的年增长速率($5.1297 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)显著高于 2001—2011 年($1.8097 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)(图 4)。

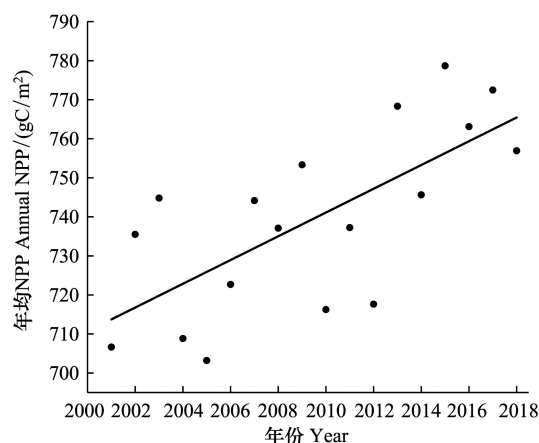


图 2 NPP 时间变化趋势

Fig.2 Temporal trend of NPP

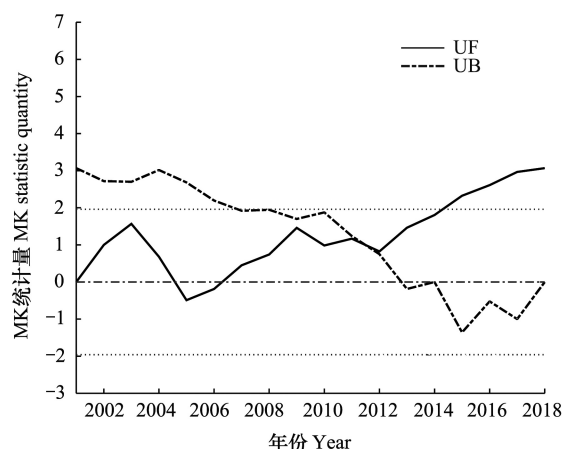


图 3 2001—2018 年 M-K 突变分析

Fig.3 Mann-Kendall test of NPP in 2001—2018

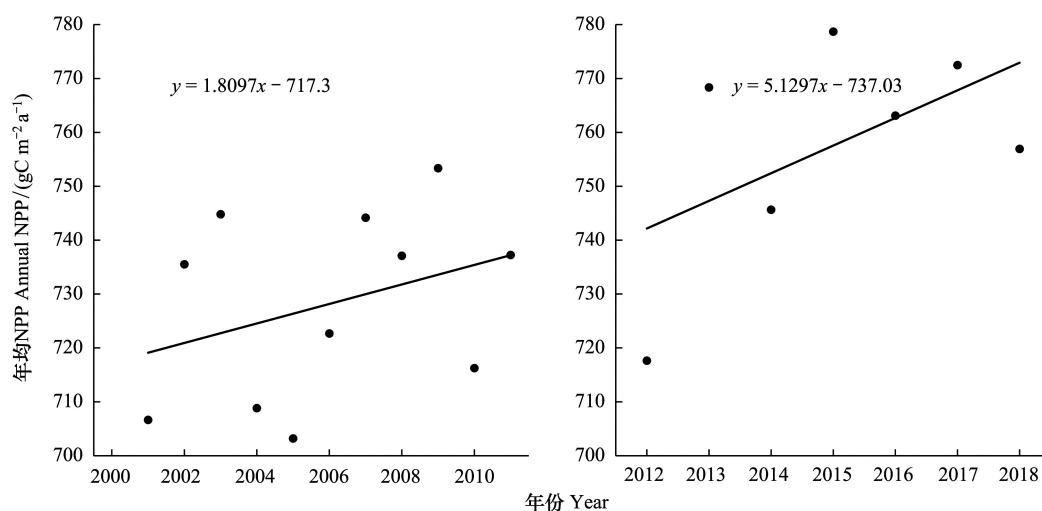


图 4 2001—2011 年与 2012—2018 年分时段 NPP 时间变化趋势图

Fig.4 Temporal trend of NPP in 200—2011 and 2012—2018

3.2 西南地区 NPP 空间变化

为更加直观了解西南地区植被 NPP 变化情况,本文将西南地区植被 NPP 变化趋势划分为显著降低、轻度降低、稳定不变、轻度增长和显著增长 5 个类别,并对 2001—2011 年和 2012—2018 年两个时段的不同变化趋势占比进行统计。

结果显示(图 5),2001—2011 年西南地区 53% 的区域植被 NPP 稳定不变,而显示出轻度增长和显著增长的区域占比分别为 30% 和 3%,而表现为轻度降低和显著降低的区域占比分别为 10% 和 4%。增长较为显著的区域主要分布在云南东部与贵州交界处,而下降区域主要分布在云南南部和广东东部地区。

2012—2018 年西南地区植被 NPP 变化趋势表现为增长的区域相较于前一时段有所提高,轻度增长和显著增长的区域分别占区域面积的 32% 和 17%。显示出稳定不变的区域相比 2001—2011 年有所减少,占比为 37%,而植被 NPP 轻度下降和显著下降的区域分别占比 12% 和 3%,与 2001—2011 年差异不大,表明在该时段西南地区植被 NPP 以增长为主。2012—2018 年西南地区植被 NPP 增长区域主要分布在云南、广西、广东

以及四川东部地区,而下降的区域主要分布在云南西部和贵州中部地区。

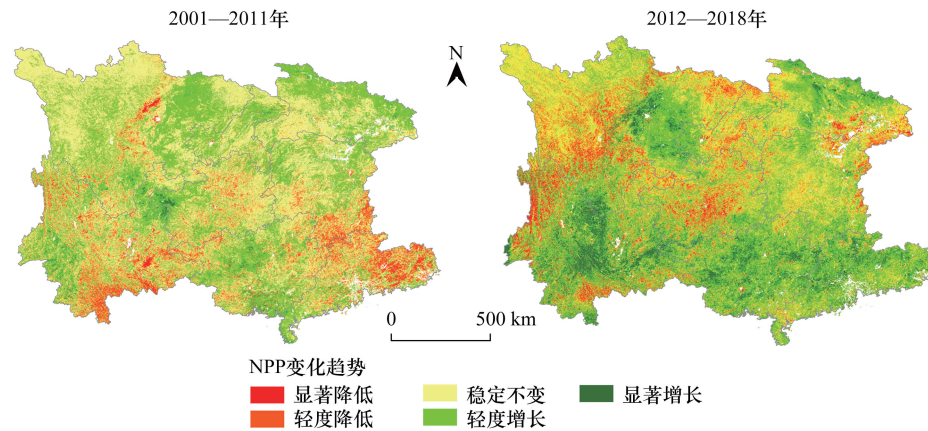


图 5 西南地区分时段 NPP 变化趋势空间分布图

Fig.5 The spatial distribution of NPP change trend in Southwest China

对不同岩性下 NPP 增长速率的提取结果显示,在 2001—2011 年和 2012—2018 年两个时间段内的不同岩性下 NPP 变化存在明显的差异(表 1)。从 2001—2011 年,整个西南地区的增长率为 $1.78 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,其中非岩溶区的增长速率为 $1.71 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,而岩溶区的增长速率为 $1.80 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,岩溶区 NPP 增长率略高于非岩溶区。在 2012—2018 年间,西南地区 NPP 年增长率为 $5.13 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,非岩溶区增长速率为 $5.02 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,而岩溶区为 $5.15 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,其中增长速率最高为灰岩分布区,为 $5.54 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,其次是灰岩与白云岩互层区,为 $5.37 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

表 1 西南地区不同岩性 NPP 分时段增长表

Table 1 NPP growth of different lithology in Southwest China

区域 Rrgions	时间段 Time period	增长速率 Increasing rate/ ($\text{gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)	区域 Rrgions	时间段 Time period	增长速率 Increasing rate/ ($\text{gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)
西南地区 Southwest China	2001—2011 年	1.78	白云岩 Dolomite	2001—2011 年	1.99
	2012—2018 年	5.13		2012—2018 年	4.56
非岩溶区 Nonkarst	2001—2011 年	1.71	灰岩与白云岩互层	2001—2011 年	1.19
	2012—2018 年	5.02	Miexed limestone/dolomite	2012—2018 年	5.37
岩溶区 Karst	2001—2011 年	1.80	碳酸盐岩夹碎屑岩	2001—2011 年	1.83
	2012—2018 年	5.15	Impure carbonate rocks	2012—2018 年	5.16
灰岩 Limestone	2001—2011 年	2.21			
	2012—2018 年	5.54			

3.3 西南地区气候因子时空变化

对西南地区气温和降水的趋势分析结果(图 6)表明,2001—2018 年间西南地区的温度和降水除特殊年份外都表现为平稳趋势(温度和降水的 R^2 分别为 0.0492 和 0.0072),温度范围为 $15.27\text{--}16.05^\circ\text{C}$,最高温度出现在 2006 年为 16.05°C ,最高温度出现在 2011 年为 15.27°C 。降水的范围为 $1066.42\text{--}1414.61 \text{ mm}$,2002 年降雨量最高,为 1414.61 mm ,2011 年最低,为 1066.42 mm 。

根据 NPP 的突变点将降水和温度的变化趋势分为 2001—2011 年和 2012—2018 年两个时间段。2001—2011 年的 11 年间,西南地区的降水量显示出略微下降趋势,在 2011 年出现最低值,而温度较为稳定。2012—2018 年间,降雨量呈略微上升趋势,而温度相比于 2001—2011 年间也有略微上升。

从空间上看(图 7),2001—2018 年间西南地区有占总面积 66%的区域温度呈现上升趋势,而下降区域占

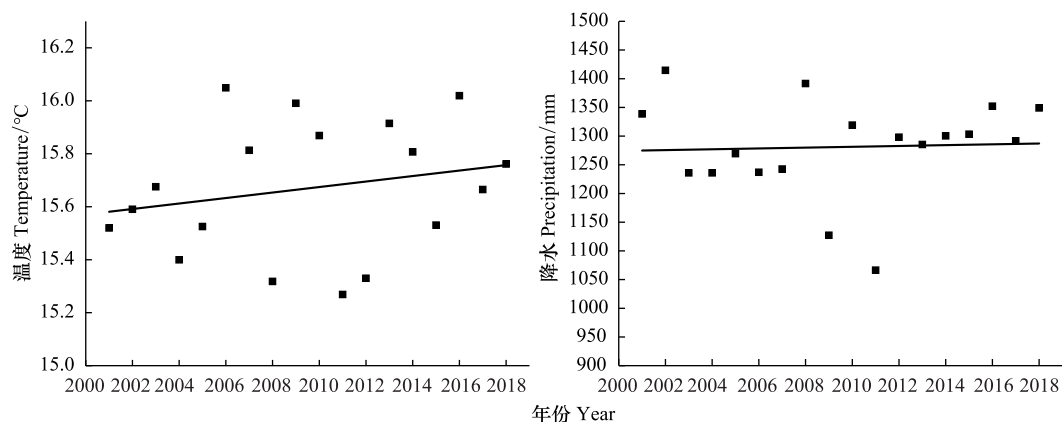


图6 2001—2018年西南地区温度降水变化趋势

Fig.6 Trend of Temperature and Precipitation in Southwest China

总面积 34%, 上升的区域显著大于下降的区域。在降水方面, 增长和下降的区与占比差距不大, 占总面积 52% 的区域表现为上升趋势, 其余 48% 表现为下降趋势。

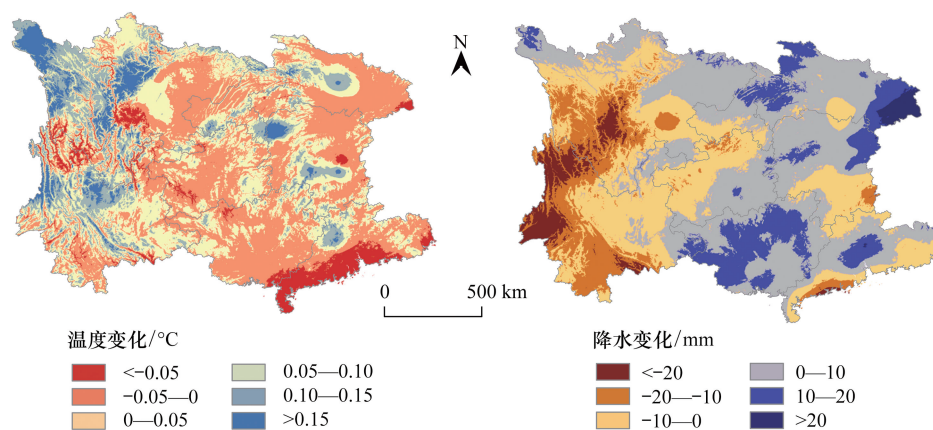


图7 西南地区温度、降水变化趋势空间分布

Fig.7 Spatial distribution of temperature and precipitation trend in Southwest China

4 讨论

4.1 气候因子对 NPP 变化影响

气候通过改变环境条件在植被的生理结构、过程等方面控制植被 NPP 的形成, 因而 NPP 的变化能直接反映植被生态系统对环境气候条件的响应^[24]。本文选取了西南地区 2001—2018 年的温度、降水数据与 NPP 数据进行偏相关分析, 讨论气候因子对植被 NPP 变化的影响。

温度对植被 NPP 的影响是一个复杂的过程, 温度的升高对植被的光合作用有促进作用^[25]。Quan 等人^[26]的控制实验结果显示, 温度增长 1.5℃ 和 2.5℃ 分别能使 NPP 增长 20.05% 和 38.70%, 表明温度增长对 NPP 有正向作用。本文对温度与 NPP 的偏相关分析结果表明, 温度与植被 NPP 存在正相关性, 2001—2011 和 2012—2018 年的平均相关系数分别为 $R=0.19$ 和 $R=0.26$ (图 8), 说明 2012—2018 年温度变化对西南地区 NPP 的影响比 2001—2011 年更强。温度升高有助于促进植被的光合作用, 进而有利于提高植被净初级生产力, 本文对西南地区温度以及 NPP 的变化的研究结果表明, 2012—2018 年的温度相较于 2001—2011 有轻度

升高,而 NPP 也保持着增长趋势。

对不同岩性分区温度与 NPP 的平均偏相关系数统计结果显示,在整个 2001—2011 年间,岩溶区和非岩溶区的 NPP 与温度都保持正相关,而岩溶区 NPP 与温度的相关性($R=0.23$)高于非岩溶区($R=0.18$),其中白云岩区明显高于非岩溶区($R=0.31$),而在 2012—2018 年期间,岩溶区和非岩溶区 NPP 与温度相关性比 2001—2011 年更高,而岩溶区的增幅大于非岩溶区,说明岩溶区植被 NPP 对温度变化的响应强于非岩溶区。

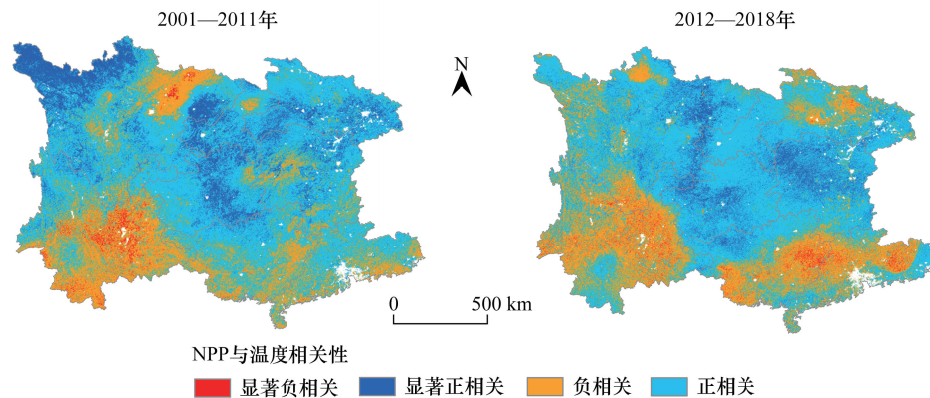


图 8 西南地区温度与 NPP 偏相关分析

Fig.8 Partial correlation analysis between temperature and NPP in Southwest China

水分在植物生长发育过程中起着重要作用,水分需求、水分平衡影响着植物光合作用,从而对 NPP 产生影响。而水分胁迫能导致气孔导度降低甚至关闭,植物蒸腾和光合作用都显著下降,植物在防止叶片失水的同时也减少了干物质的积累^[24]。综合来看,干旱地区降水量的增长能缓解水分胁迫,对 NPP 增长有促进作用,而在湿润地区,当降水量达到一定阈值后 NPP 会随降水量增长而下降^[27]。对西南地区 NPP 与降水的偏相关分析结果显示,2001—2018 年,降水与植被 NPP 总体呈正相关关系,但对比 2001—2011 年与 2012—2018 年两个时间段的相关性结果可知,2001—2011 年的相关程度高于 2012—2018 年(图 9)。2001—2011 年西南地区降水量处于下降趋势,而 2012—2018 年,降水量表现出轻微上升趋势,西南地区常年降水充沛,植物生长茂盛,但降水持续增长会影响植物接受到的阳光,降低环境温度,影响植被的光合作用,最终阻碍 NPP 的增长。

对不同岩性分区 NPP 与降水的偏相关系数统计结果表明(表 2),在 2001—2011 年间,岩溶区 NPP 与降

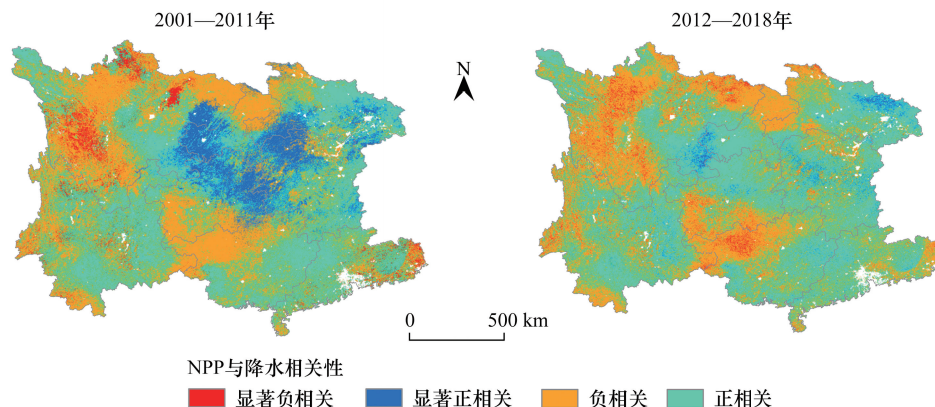


图 9 西南地区降水与 NPP 偏相关分析

Fig.9 Partial correlation analysis between precipitation and NPP in Southwest China

水平均相关系数高于非岩溶区(分别为 $R=0.17$ 和 $R=0.03$),而在 2012—2018 年,岩溶区的相关系数有所下降,不同岩性分区下的 NPP 与降水相关性差异减小,灰岩分布区甚至出现负相关趋势,而岩溶区的平均相关系数也低于非岩溶区($R=0.02$ 和 $R=0.06$),这表明降水对岩溶区植被 NPP 的影响程度在下降。

表 2 2001—2011 年、2012—2018 年不同岩性温度、降水与 NPP 相关性统计

Table 2 Statistics of partial correlation between climate factors and NPP for different regions in 2001—2011 and 2012—2018

岩性分区 Regions	温度 Temperature		降水 Precipitation	
	2001—2011	2012—2018	2001—2011	2012—2018
西南地区 Southwest China	0.19	0.26	0.07	0.05
非岩溶区 Nonkarst	0.18	0.23	0.03	0.06
岩溶区 Karst	0.23	0.33	0.17	0.02
灰岩 Limestone	0.22	0.31	0.16	-0.01
白云岩 Dolomite	0.31	0.43	0.32	0.12
白云岩与灰岩互层 Mixed limestone/dolomite	0.23	0.38	0.21	0.09
碳酸盐岩夹碎屑岩 Impure carbonate rocks	0.24	0.32	0.12	0.03

综上,西南地区温度对 NPP 变化的影响要强于降水,因为温度的持续增长会促进植被的光合作用,对植被的初级生产力增长有促进作用。Liu 等人^[14]的研究结果表明,广西西北岩溶地区的植被 NPP 与该地区的年均温和日照时数显示出显著的相关性,而与年降水量的相关性则不显著。而 Wang^[28]等人也发现,中国西南地区的 NDVI 与 NPP 受到温度变化的影响比降水的影响显著,这些研究结果与本文的研究结果相似。

4.2 土地利用变化对西南地区植被 NPP 的影响

人类活动驱动的土地利用和覆盖变化深刻的改变了地表自然生态系统的结构和功能。人类活动不仅使地表景观发生改变,也导致地表生态系统的碳通量发生改变^[29]。植被 NPP 是地表碳循环的主要组成部分之一,代表了生态系统的固碳能力^[30]。评估土地利用变化对植被 NPP 的影响对于了解人类活动对生态系统的结构和功能变化的作用至关重要。

如表 3 所示,2000—2018 年,西南地区耕地和草地面积持续减少,两种土地类型分别减少 16989 km² 和 13100.56 km²。而林地、水域和城市用地的面积持续增长,分别增加 6907.97 km²、4487.40 km² 和 21763.92 km²。

表 3 2000—2018 年分时段土地转移矩阵/km²

Table 3 Transition matrix of land use types between 2000 and 2010 and between 2010 and 2018

2000	2010					
	耕地 Cropland	林地 Forest	草地 Grassland	水域 Water area	城市用地 Urban land	未利用地 Unused land
耕地 Cropland	483318.42	3530.32	850.76	1522.74	4242.94	19.84
林地 Forest	1476.74	1015281.49	1901.60	354.39	1365.23	69.87
草地 Grassland	800.67	3748.44	336564.14	161.99	211.95	161.20
水域 Water area	261.76	83.44	18.77	34089.35	600.70	73.94
城市用地 Urban land	215.53	66.94	9.84	74.74	23517.78	1.31
未利用地 Unused land	10.24	12.46	85.62	63.61	3.36	19635.78

2010	2018					
	耕地 Cropland	林地 Forest	草地 Grassland	水域 Water area	城市用地 Urban land	未利用地 Unused land
耕地 Cropland	292785.66	127614.05	34240.07	10716.14	20298.66	336.00
林地 Forest	127114.43	793149.28	86038.56	7024.16	7955.56	1015.12
草地 Grassland	35462.93	94157.87	197975.85	2180.84	2065.04	7406.01
水域 Water area	9495.54	5218.67	1470.19	17156.79	2200.22	727.97
城市用地 Urban land	10927.85	3991.10	811.38	1504.39	12720.67	24.07
未利用地 Unused land	331.87	1486.63	7349.48	581.23	46.37	10147.97

2000—2010 年间,耕地减少 7405.26 km²,其主要的损失形式是转化为城市用地,约 42%的耕地转化为城市用地,其次是转化为林地,约有 35%的耕地转化为林地。草地和耕地转化为林地是林地增长的主要形式,分别占增长面积的 50%和 47%。

2010—2018 年,耕地面积的主要损失形式是转化为林地(127614.05 km²),这也是林地面积的主要增长方式。城市用地面积在这一时期增长 15648.01 km²,主要是由耕地转化而来(62%)。

土地利用变化对植被 NPP 的影响表现为:当高植被生产力的土地利用类型(如林地、草地等)向低植被生产力的土地利用类型(如:城市用地、水域等)转化时会使得 NPP 总量降低,反之则会带来 NPP 总量的增加^[31]。对不同 NPP 总量变化情况的计算可用来衡量不同土地利用类型面积变化造成的 NPP 的增加/损失情况^[16]。由表 4 可知:2001—2011 年土地利用转变造成西南地区 NPP 总量变化 0.2248 Tg C,其中,向林地转化带来的 NPP 总量增长占总增长的 62%。各种土地利用类型转化中,向城市用地的转换造成了 NPP 总量减少,减少量为 0.0999 Tg C。而在 2011—2018 年,土地利用变化使得 NPP 总量增长 12.7870 Tg C,其中向耕地和林地的转化贡献最高,而其他土地利用类型向未利用地转化造成了 NPP 总量的减少,减少量为 0.1827 Tg C。不同土地利用变化下 NPP 总量变化情况说明林地和耕地面积的增加促进了西南地区 NPP 总量的增长,而城市用地面积和未利用地面积的增加分别导致 2001—2011 年和 2012—2018 年两个时期西南地区 NPP 总量的减少。

表 4 西南地区土地利用类型转化下 NPP 总量变化矩阵/Tg C

Table 4 Total NPP change under different transition matrix in 2001—2011 and 2012—2018

2001	2011						
	耕地 Cropland	林地 Forest	草地 Grassland	水域 Water area	城市用地 Urban land	未利用地 Unused land	行变化量 Total in row
耕地 Cropland		0.0675	0.0366	0.0523	-0.0773	0.0009	0.0801
林地 Forest	0.0193		0.0452	-0.0062	-0.0332	-0.0031	0.0221
草地 Grassland	0.0167	0.0680		-0.0007	-0.0046	0.0016	0.0809
水域 Water area	0.0125	0.0012	0.0009		0.0154	0.0033	0.0333
城市用地 Urban land	0.0029	0.0014	-0.0001	0.0013		0.0001	0.0056
未利用地 Unused land	0.0008	0.0001	0.0012	0.0009	-0.0002		0.0028
列变化量 Total in column	0.0522	0.1383	0.0838	0.0476	-0.0999	0.0028	0.2248

2010	2018						
	耕地 Cropland	林地 Forest	草地 Grassland	水域 Water area	城市用地 Urban land	未利用地 Unused land	行变化量 Total in row
耕地 Cropland		4.6803	1.0851	0.1897	0.4814	0.0015	6.4381
林地 Forest	4.3487		0.0212	0.1738	0.2204	-0.0226	4.7415
草地 Grassland	1.1094	0.0483		0.0059	0.0280	-0.1449	1.0466
水域 Water area	0.1947	0.1307	0.0137		0.0380	-0.0168	0.3602
城市用地 Urban land	0.2507	0.1075	0.0215	0.0221		0.0002	0.4020
未利用地 Unused land	0.0025	-0.0383	-0.1565	-0.0089	-0.0002		-0.2014
列变化量 Total in column	5.9060	4.9285	0.9850	0.3826	0.7675	-0.1827	12.7870

4.3 西南地区生态工程对 NPP 的影响

为改善生态环境,中国政府于 1999 年实施了一项名为“退耕还林”的生态工程,目的是减轻中国的土壤侵蚀、荒漠化和其他生态问题。研究结果显示^[32],在中国政府制定的退耕还林计划显著增加了中国的绿化面积。Chen 等^[11]的研究结果表明,造林工程促进了中国的绿化趋势,这种趋势在中国西南地区尤为显著,而人工林数量的快速增长导致了 LAI 和 NPP 的快速增长。2001—2018 年间,西南地区造林增加面积是非常可观的(图 10),而利用造林面积年累计数据与各年 NPP 均值进行相关性分析结果显示,西南地区造林面积与 NPP 变化存在显著正相关性($R=0.7, P<0.01$),说明“退耕还林”生态工程对西南地区植被 NPP 增长存在显

著促进作用。

由于西南地区特殊岩溶环境和高人口压力,导致西南地区石漠化现象十分严重,为了防治西南地区岩溶区的石漠化问题,中央政府在西南八个省份启动了《关于全面解决岩溶石漠化的总体规划纲要(2006—2015年)》,旨在恢复西南地区的植被状况。2005年以来的3次石漠化治理监测结果显示,2005—2011年间,石漠化土地面积减少了96万公顷,减少率为7.4%,年均缩减率为1.27%;2011—2016年间,石漠化土地面积减少了193.2万公顷,减少率为16.1%,年均缩减率为3.45%(数据来自国家林业与草原局《中国岩溶地区石漠化状况公报》)。2011—2016年间的石漠化减少率明显高于前一个时间段,说明2011—2016年间西南地区的生态环境显著改善,而本文研究结果显示,西南地区NPP变化趋势于2011年存在突变点,2011年后NPP增长趋势显著高于2011年之前,这一结果与西南地区石漠化变化情况存在一致性,因此可以认为,西南地区石漠化治理工程对NPP的增长有重要的促进作用。

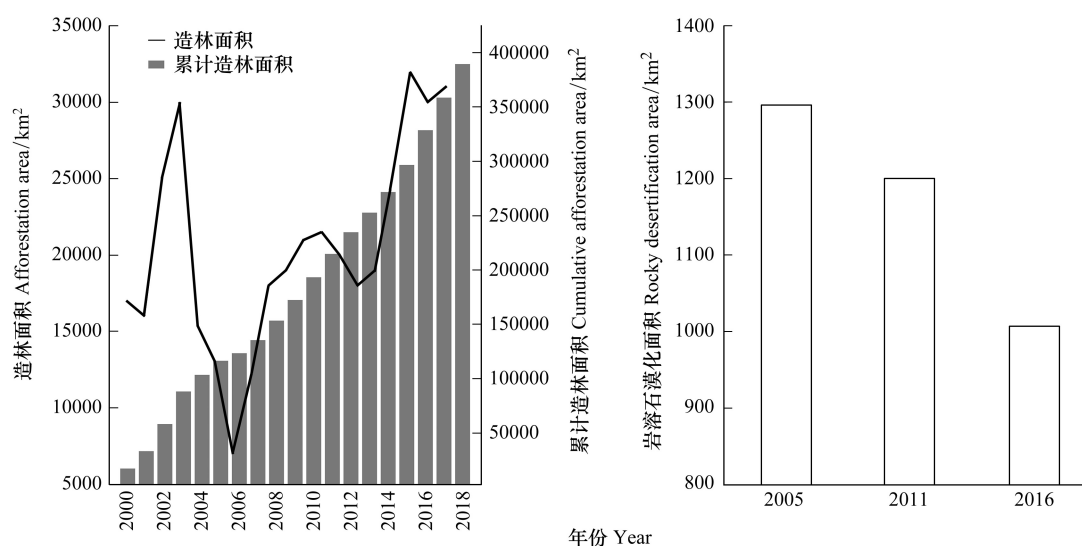


图 10 累计造林面积和石漠化面积

Fig.10 Cumulative afforestation area and Rocky desertification area

5 结论

本文利用 MODIS 遥感数据研究了中国西南地区植被 NPP 的时空格局及其变化。结果表明:

(1) 2001—2018 年西南地区植被 NPP 保持增长趋势。从 2001—2018 年,植被 NPP 以 $3.0424 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ($P < 0.01$) 的速度增长,并在 2011 年后显著增加。与非岩溶区相比,岩溶区的植被 NPP 增长的更快,其中石灰岩地区在两个时段的增长率为 $2.21 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $5.54 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,显著高于其他区域。

(2) 西南地区植被 NPP 对温度的响应程度要强于对降水的响应程度。植被 NPP 与气候数据的相关分析结果显示,在两个时段,植被 NPP 与温度的平均相关系数分别为 $R = 0.19$ 和 $R = 0.26$,而与降水的平均相关系数为 $R = 0.07$ 和 $R = 0.05$,说明温度对植被 NPP 变化的影响要强于降水。不同岩性下植被 NPP 与气候因子相关性结果表明,岩溶区对温度的响应要强于非岩溶区,其中白云岩地区在两个时段都高于其他区域。

(3) 城市用地和未利用地面积的增加造成了西南地区植被 NPP 总量的降低。对两个时期土地利用变化下 NPP 总量的变化情况的研究结果显示,在 2001—2011 年和 2012—2018 年两个时间段当土地利用类型向林地、耕地转变时 NPP 总量增加,2001—2011 年期间土地利用方式向城市用地转变时 NPP 总量下降,2012—2018 年土地利用方式向未利用地转变时 NPP 总量下降。

(4) 西南地区植被 NPP 增长与研究区内生态工程实施显著正相关。“退耕还林”工程实施后西南地区绿

化面积显著增长,2001—2018 年西南地区累计造林面积 372800 km²,在石漠化治理工程的影响下 2005—2016 年西南地区石漠化面积减少 28900 km²。累计造林面积与 NPP 存在显著正相关性($R=0.7, P<0.05$)。不同时期石漠化面积统计结果显示,2011 年后石漠化面积减少率明显快于 2011 年前,而这一结果与本研究 NPP 的突变分析结果一致,说明石漠化治理对西南地区 NPP 变化有重要作用。

参考文献(References):

- [1] Lieth H. Primary production: terrestrial ecosystems. *Human Ecology*, 1973, 1(4): 303-332.
- [2] Jackson H, Prince S D. Degradation of net primary production in a semiarid rangeland. *Biogeosciences*, 2016, 13(16): 4721-4734.
- [3] Erb K H, Fetzel T, Plutzer C, Kastner T, Lauk C, Mayer A, Niedertscheider M, Körner C, Haberl H. Biomass turnover time in terrestrial ecosystems halved by land use. *Nature Geoscience*, 2016, 9(9): 674-678.
- [4] He L M, Chen J M, Pan Y D, Birdsey R, Kattge J. Relationships between net primary productivity and forest stand age in U.S. forests. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26(3): GB3009.
- [5] Liu H Y, Mi Z R, Lin L, Wang Y H, Zhang Z H, Zhang F W, Wang H, Liu L L, Zhu B, Cao G M, Zhao X Q, Sanders N J, Classen A T, Reich P B, He J S. Shifting plant species composition in response to climate change stabilizes grassland primary production. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4051-4056.
- [6] Yan H M, Zhan J Y, Yang H C, Zhang F, Wang G F, He W J. Long time-series spatiotemporal variations of NPP and water use efficiency in the lower Heihe River Basin with serious water scarcity. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2016, 96: 41-49.
- [7] Yan H M, Zhan J Y, Jiang Q O, Yuan Y W, Li Z H. Multilevel modeling of NPP change and impacts of water resources in the Lower Heihe River Basin. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2015, 79-82: 29-39.
- [8] Taelman S E, Schaubroeck T, De Meester S, Boone L, Dewulf J. Accounting for land use in life cycle assessment: the value of NPP as a proxy indicator to assess land use impacts on ecosystems. *Science of the Total Environment*, 2016, 550: 143-156.
- [9] Yang H F, Mu S J, Li J L. Effects of ecological restoration projects on land use and land cover change and its influences on territorial NPP in Xinjiang, China. *CATENA*, 2014, 115: 85-95.
- [10] 孙庆龄, 李宝林, 李飞, 张志军, 丁玲玲, 张涛, 许丽丽. 三江源植被净初级生产力估算研究进展. *地理学报*, 2016, 71(9): 1596-1612.
- [11] Chen Y Z, Chen L Y, Cheng Y, Ju W M, Chen H Y H, Ruan H H. Afforestation promotes the enhancement of forest LAI and NPP in China. *Forest Ecology and Management*, 2020, 462: 117990.
- [12] Wu L H, Wang S J, Bai X Y, Tian Y C, Luo G J, Wang J F, Li Q, Chen F, Deng Y H, Yang Y J, Hu Z Y. Climate change weakens the positive effect of human activities on karst vegetation productivity restoration in southern China. *Ecological Indicators*, 2020, 115: 106392.
- [13] Zhang R, Zhou Y, Luo H X, Wang F T, Wang S X. Estimation and analysis of spatiotemporal dynamics of the net primary productivity integrating efficiency model with process model in Karst area. *Remote Sensing*, 2017, 9(5): 477.
- [14] Liu H Y, Zhang M Y, Lin Z S. Relative importance of climate changes at different time scales on net primary productivity—a case study of the Karst area of northwest Guangxi, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189(11): 539.
- [15] 王新闯, 王世东, 张合兵. 基于 MOD17A3 的河南省 NPP 时空格局. *生态学杂志*, 2013, 32(10): 2797-2805.
- [16] 李金珂, 杨玉婷, 张会茹, 黄铝文, 高义民. 秦巴山区近 15 年植被 NPP 时空演变特征及自然与人为因子解析. *生态学报*, 2019, 39(22): 8504-8515.
- [17] 张筠, 张春华, 张安定, 方美红, 吴孟泉, 林哲, 张奕昂, 宋晓林. 水热波动和土地覆盖变化对东北地区植被 NPP 的相对影响. *生态学报*, 2020, 40(21): 7733-7744.
- [18] 苏维词, 杨华, 李晴, 郭跃, 陈祖权. 我国西南喀斯特山区土地石漠化成因及防治. *土壤通报*, 2006, 37(3): 447-451.
- [19] Zhao P, Wang D J, He S T, Lan H J, Chen W L, Qi Y C. Driving forces of NPP change in debris flow prone area: a case study of a typical region in SW China. *Ecological Indicators*, 2020, 119: 106811.
- [20] Liu J Y, Kuang W H, Zhang Z X, Xu X L, Qin Y W, Ning J, Zhou W C, Zhang S W, Li R D, Yan C Z, Wu S X, Shi X Z, Jiang N, Yu D S, Pan X Z, Chi W F. Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(2): 195-210.
- [21] 赵晓, 周文佐, 田罗, 何万华, 章金城, 刘东红, 杨帆. 土地利用变化对三峡库区重庆段植被净初级生产力的影响. *生态学报*, 2018, 38(21): 7658-7668.
- [22] 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 Observation and Geoinformation*, 2017, 54: 105-113.

- [23] Mohsin T, Gough W A. Trend analysis of long-term temperature time series in the Greater Toronto Area (GTA). *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 101(3/4): 311-327.
- [24] 徐雨晴, 肖风劲, 於琍. 中国森林生态系统净初级生产力时空分布及其对气候变化的响应研究综述. *生态学报*, 2020, 40(14): 4710-4723.
- [25] 刘曦, 国庆喜, 刘经纬. IBIS 模拟东北东部森林 NPP 主要影响因子的敏感性. *生态学报*, 2011, 31(7): 1772-1782.
- [26] Quan Q, Zhang F Y, Meng C, Ma F F, Zhou Q P, Sun F B, Niu S L. Shifting biomass allocation determines community water use efficiency under climate warming. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(9): 094041.
- [27] 丁庆福, 王军邦, 齐述华, 叶辉, 黄玫, 徐跃通, 应天玉, 陶健. 江西省植被净初级生产力的空间格局及其对气候因素的响应. *生态学杂志*, 2013, 32(3): 726-732.
- [28] Wang J, Meng J J, Cai Y L. Assessing vegetation dynamics impacted by climate change in the southwestern karst region of China with AVHRR NDVI and AVHRR NPP time-series. *Environmental Geology*, 2008, 54(6): 1185-1195.
- [29] Buyantuyev A, Wu J. Urbanization alters spatiotemporal patterns of ecosystem primary production: a case study of the Phoenix metropolitan region, USA. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73(4/5): 512-520.
- [30] Liang W, Yang Y T, Fan D M, Guan H D, Zhang T, Long D, Zhou Y, Bai D. Analysis of spatial and temporal patterns of net primary production and their climate controls in China from 1982 to 2010. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 204: 22-36.
- [31] 姜春, 吴志峰, 程炯, 钱乐祥. 广东省土地覆盖变化对植被净初级生产力的影响分析. *自然资源学报*, 2016, 31(6): 961-972.
- [32] Chen C, Park T, Wang X H, Piao S L, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C, Nemani R R, Myneni R B. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2019, 2(2): 122-129.